

Elementy i układy mikrohydrauliczne w maszynach mobilnych

Wacław Kollek, Zygmunt Kudźma, Grzegorz Łomotowski, Michał Stosiak

1. Wprowadzenie

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. Porównanie gabarytów silnika elektrycznego, pneumatycznego i hydraulicznego o tych samych mocach pokazano na rys. 1.

Między innymi ze względu na te zalety napęd hydrostatyczny dominuje w urządzeniach określanych ogólnie jako maszyny robocze ciężkie. Jako przykład można podać ładowarki, gdzie napęd osprzętu jest obecnie rozwiązany wyłącznie na drodze hydrostatycznej, pod-

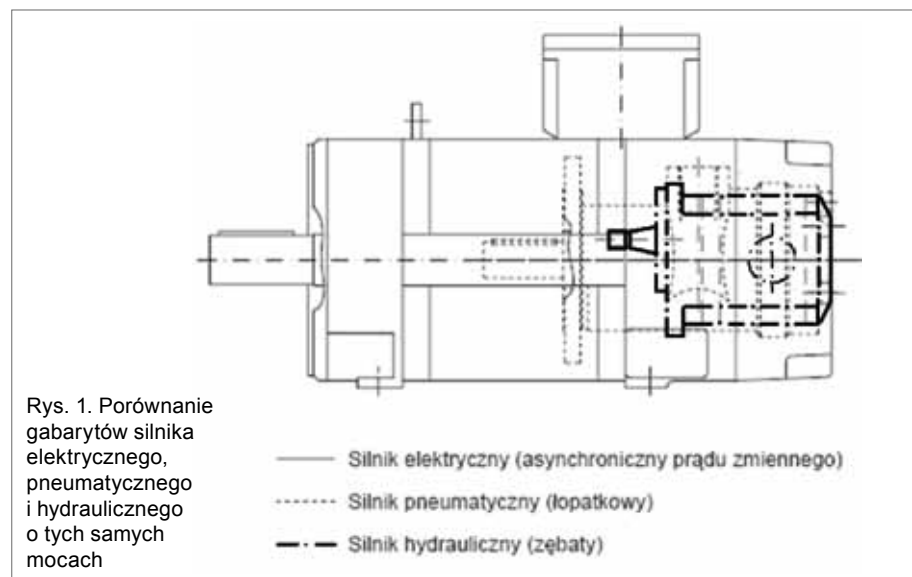
czas gdy w mechanizmie jazdy spotyka się zarówno rozwiązania hydrostatyczne, jak i hydromechaniczne z elementami hydrokinetycznymi. W ostatnich latach zauważyć można intensywny rozwój różnego typu systemów sterowania, wpływających na parametry stanów nieustalonych, jak i właściwości w ruchu ustalonym hydrostatycznych układów napędowych. Szczególnie należy tu wymienić układy *load sensing* lub sterowane mikroprocesorowo w technice proporcjonalnej. Projektant układu napędowego, obok tak podstawowych parametrów, jak moc wyjściowa, zakres prędkości elementu napędzanego, sprawność itd., stoi przed problemem zapewnienia określonych właściwości dynamicznych ze względu na specyfikę projektowanej maszyny. Kryteria oceny maszyn i urządzeń, a w szczególności maszyn z napędem hydrostatycznym, stawiane wspólnie, zostały ostatnio poszerzone o kryterium hałaśliwości ich pracy. Hydrostatyczne układy napędowe, obok powszechnie znanych zalet, mają też istotną wadę – są źródłem hałasu o stosunkowo wysokim poziomie, co może być czynnikiem dyskwalifikującym ten rodzaj na-

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest nowatorskiej dziedzinie techniki, jaką jest mikrohydraulika. W artykule wskazano możliwości zastosowań mikrohydrauliki w maszynach mobilnych. Zaprezentowane zostały przykładowe elementy mikrohydrauliczne dostępne na rynku. W artykule zamieszczone zostały opisy elementów projektowanych przez autorów oraz przykładowe wyniki badań tych elementów. Szczególną uwagę poświęcono problemowi drgań mechanicznych, mogących zakłócać pracę elementów mikrohydraulicznych.

Słowa kluczowe: mikrohydraulika, mikroawary, mikrozasilacz, mikro-pompa, mikrosilnik.

UK MICROHYDRAULIC ELEMENTS AND SYSTEMS IN MOBILE MACHINES

Abstract: In the paper some of applications of microhydraulic components and systems were presented. Special attention was focused on their advantages and limitations. Some problems with microhydraulic systems operation were presented too. Moreover some disturbing signals for microhydraulics were defined. In the paper several examples of designed microelements were presented and some tests results were shortly described too.



pędu ze względu na przekroczenie normatywnych wartości hałasu (sukcesywnie obniżanych) określonych względami ergonomicznymi. Z tego też względu poprawnie skonstruowany układ, obok założonych właściwości statycznych i dynamicznych, powinien zapewnić możliwie najniższy poziom emitowanego hałasu [1].

Ponadto wyraźnie zauważalna jest w ostatnich latach silna tendencja do redukcji wymiarów oraz masy elementów i układów hydraulicznych, co wpływa na intensywny rozwój nowego obszaru hydrauliki zwanego mikrohydrauliką. Kłasyfikacji przepływów, a co za tym idzie, określenia obszaru zastosowań mikrohydrauliki można dokonać według [2] następująco:

- przepływy bardzo małe
 $< 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ($< 120 \text{ cm}^3/\text{min}$);
- przepływy małe
 $2\text{--}50 \text{ cm}^3/\text{s}$ ($120\text{--}3000 \text{ cm}^3/\text{min}$);
- przepływy średnie
 $50\text{--}500 \text{ cm}^3/\text{s}$ ($3\text{--}30 \text{ dm}^3/\text{min}$);
- przepływy duże
 $500\text{--}2000 \text{ cm}^3/\text{s}$ ($30\text{--}120 \text{ dm}^3/\text{min}$);
- przepływy bardzo duże
 $> 2000 \text{ cm}^3/\text{s}$ ($> 120 \text{ dm}^3/\text{min}$).

W napędach hydraulicznych przyjęto się, że do grupy elementów mikrohydraulicznych zaliczane są dwa pierwsze, o zakresie przepływu do $50 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Od elementów i układów mikrohydraulicznych oczekuje się m.in.:

- pewności działania;
- niskiego poziomu hałasu;
- małych wymiarów przy zachowaniu przenoszonych mocy.

W napędach hydrostatycznych kłasyfikacyjnych stosuje się odpowiednie typoszeregi wielkości nominalnych WN. I tak dla zaworów wielkością nominalną jest średnica nominalna otworów przepływowych. Wszystkie elementy hydrauliczne o średnicach nominalnych mniejszych od 6 mm [$\text{WN} < 6 \text{ mm}$] zalicza się do mikrohydrauliki [2]. Wielkością nominalną [WN] dla mikropomp zębatych jest geometryczna objętość robocza V_g [cm^3/obr].

Zmniejszenie wymiarów (do kilkunastu milimetrów czy kilku centymetrów) może wiązać się ze zmniejszeniem kosztów materiałowych, jednakże powodować może znaczące podniesienie kosztów wytwarzania, związanych m.in. z koniecznością zapewnienia bardzo wysokiej dokładności wymiarowej. Obszarami zastosowań mikrohydrauliki są te dziedziny, które wymagają przeniesienia dużej mocy, zapewnienia płynności ruchów przy znacznym ograniczeniu wymiarów geometrycznych.

Jednakże pełniejsze wykorzystanie elementów i układów mikrohydraulicznych w maszynach mobilnych napotyka na pewne trudności, m.in. ze względu na występujące zakłócenia pracy tych układów. Pracująca maszyna robocza jest źródłem drgań mechanicznych o szeroko-

kim spektrum częstotliwości. Drgania te oddziałują na operatora znajdującego się w maszynie, wszystkie podzespoły i podukłady maszyny oraz pośrednio na otaczające środowisko. Występowanie tych drgań powodować może niejednokrotnie zakłócenia w pracy całego układu hydraulicznego maszyny mobilnej. Jako zakłócenie pracy takiego układu rozumie się pojawienie się zmian w widmie pulsacji ciśnienia. To prowadzić może m.in. do zmniejszenia dokładności pozycjonowania organów wykonawczych, nierównomierności pracy, skrócenia czasu eksploatacji maszyny oraz niekiedy wzrostu poziomu emitowanego hałasu.

Obecnie na rynku światowym funkcjonują firmy wyspecjalizowane w produkcji mikroelementów hydraulicznych na skalę masową.

2. Kryteria podobieństwa w badaniach mikrohydraulicznych

W zminiaturyzowanym układzie hydrostatycznym pomiar prędkości przepływu, ciśnienia czy przemieszczenia może nastręczać trudności, gdyż wymaga zastosowania mikroczujników, które jak na razie są jeszcze elementami bardzo drogimi, oraz specjalnego zabiegu technologicznego, który umożliwi umieszczenie tych czujników w mikroelementach. Pomiar globalny prędkości oraz ciśnienia jest więc dosyć trudny, a pomiar rozkładu tych parametrów jeszcze trudniejszy. Rozsądne wydaje się więc tworzenie modeli danych mikroelementów w większej skali. Wyniki uzyskane z badań modelowych można wykorzystać do projektowania lub przeprojektowania danego mikroelementu lub interpretacji zjawisk w danym elemencie.

Aby poprawnie modelować mikroelementy bądź mikroukłady hydrauliczne za pomocą elementów bądź układów w większej skali i poprawnie interpretować otrzymane wyniki, należy postępować zgodnie z teorią podobieństwa. Teoria ta umożliwia ilościowy i jakościowy opis zjawiska rzeczywistego na podstawie pomiarów przeprowadzonych na zjawisku podobnym, zwanym zjawiskiem modelowym, które może być w innej skali niż zjawisko rzeczywiste.

Teoria podobieństwa zakłada, że dwa zjawiska, które są tego samego rodzaju, mogą być podobne, to znaczy, że skale wszystkich parametrów oraz wielkości fizycznych mogą być stałe i niezależne

od miejsca i czasu [3, 4]. Dwa zjawiska są podobne, jeśli są spełnione tak zwane kryteria podobieństwa. Jednakże próba wykorzystania teorii podobieństwa do modelowania mikroelementów bądź mikroukładów hydraulicznych za pomocą makromodeli może spotkać się z wieloma problemami. Pierwszym bardzo istotnym problemem może być odwzorowanie podobieństwa geometrycznego. Powierzchnie mikroelementów ograniczające płynącą ciecz mają określoną chropowatość o określonej strukturze, która może znacznie wpływać na zjawiska w nich zachodzące. Odwzorowanie chropowatości powierzchni mikroelementów dużo większą chropowatością w dużym elemencie modelowym i jeszcze zachowanie tej samej struktury chropowatości może okazać się bardzo trudne. Kolejnymi problemami mogą okazać się dodatkowe zjawiska, które występują w mikroskali, a nie występują w skali makro, na przykład zjawiska elektrostatyczne. W tym wypadku teoria podobieństwa jest bezsilna.

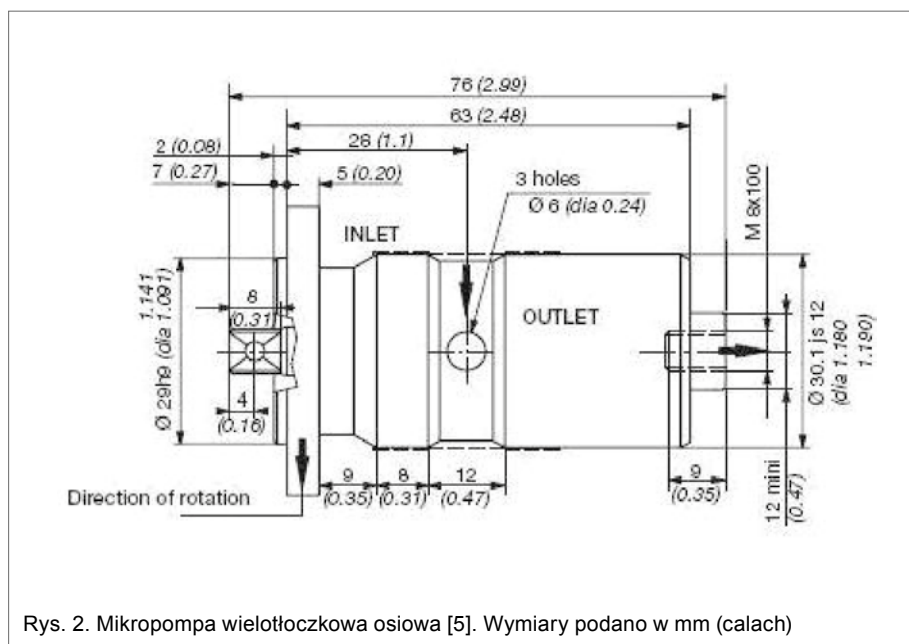
3. Elementy mikrohydrauliczne maszyn mobilnych

Na rynku istnieją firmy wyspecjalizowane w produkcji mikroelementów hydraulicznych: od pomp, poprzez zawory, do odbiorników i akcesoriów w postaci przewodów czy akumulatorów. Przykładem mikroelementu hydraulicznego jest produkowana seryjnie przez firmę Hydro Leduc pompa wielotłoczkowa osiowa stałej wydajności, przedstawiona na rysunku 2, oraz silnik hydrauliczny – rys. 3.

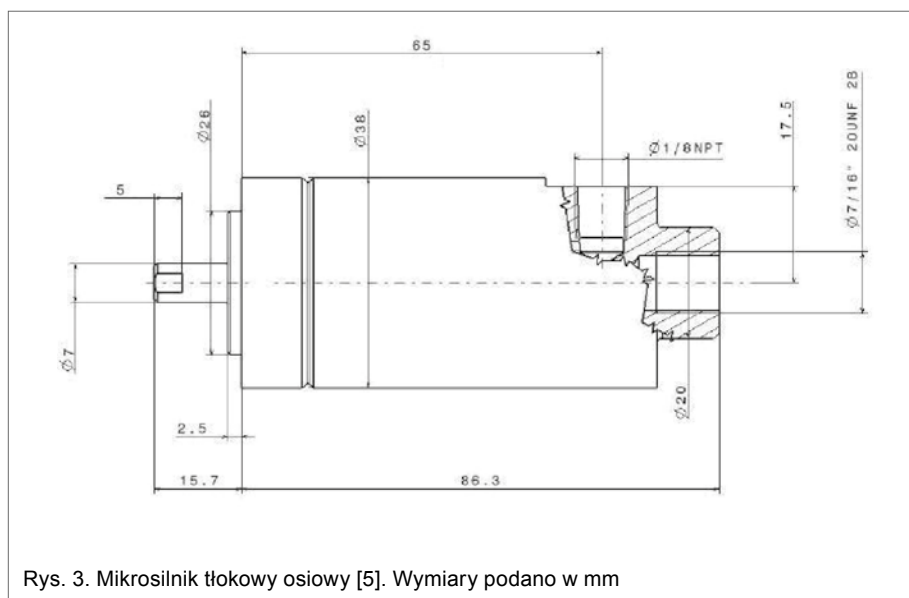
Pompa ta posiada trzy tłoczki. Producent oferuje cały typoszereg o wydajnościach właściwych od $45 \text{ mm}^3/\text{obr}$ do $70 \text{ mm}^3/\text{obr}$, prędkości obrotowej do 5000 obr/min i maksymalnych ciśnieniach pracy do 100 MPa. Na podkreślenie zasługuje fakt, że pompa ta waży zaledwie 0,3 kg. Natomiast silnik posiada siedem tłoczków. Charakteryzuje się chłonnością jednostkową $0,463 \text{ cm}^3/\text{obr}$, zakresem prędkości obrotowych od 350 do 6500 obr/min, maksymalne ciśnienia pracy to 33 MPa, a chwilowe do 40 MPa.

Z kolei firma Hoerbiger microfluid oferuje szeroką gamę mikroelementów hydraulicznych, w tym mikrorozdzielacze. Na rysunku 4 prezentuje się mikrorozdzielacz tej firmy [6].

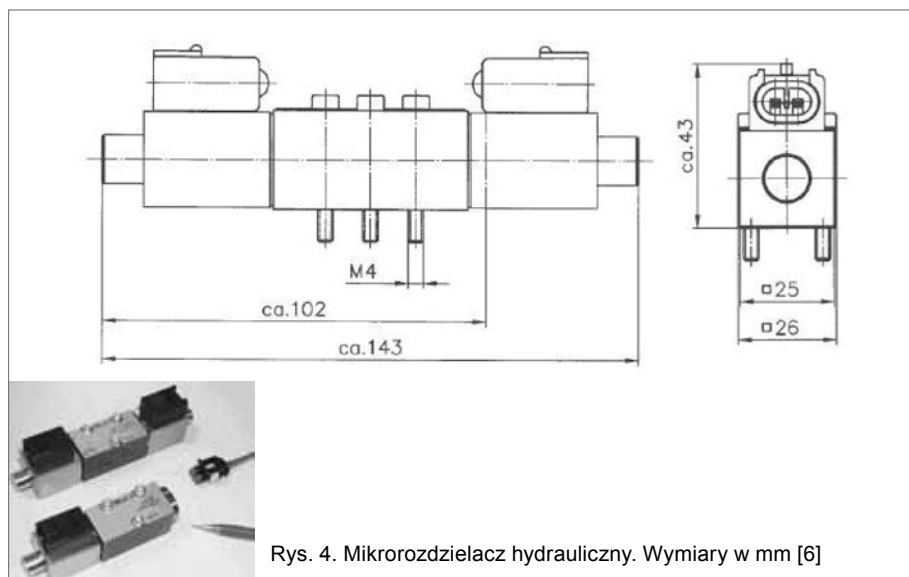
Przepływ nominalny w prezentowanym mikrorozdzielaczu wynosi $2 \text{ dm}^3/\text{min}$. Ciśnienie robocze wynosi



Rys. 2. Mikropompa wielotłoczkowa osiowa [5]. Wymiary podano w mm (calach)



Rys. 3. Mikrosilnik tłokowy osiowy [5]. Wymiary podano w mm



Rys. 4. Mikrorozdzielacz hydrauliczny. Wymiary w mm [6]



Rys. 5. Zastosowanie mikroukładów hydrostatycznych w pojazdach przystosowanych dla osób niepełnosprawnych [6]



Rys. 6. Podnoszona platforma robocza, do napędu której użyto elementów mikrohydraulicznych [6]

25 MPa. 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. Masa rozdzielacza zależy od jego rozwiązania konstrukcyjnego, tzn. liczby dróg i położen suwaka, rodzaju elektromagnesu (oferowane są długie bądź krótkie elektromagnesy). I tak mikrorozdzielacz 4/2 waży 410 g, a 4/3 waży 560 g.

4. Przykłady zastosowania elementów mikrohydraulicznych

Mikroukłady hydrostatyczne znajdują również zastosowanie w pojazdach

przystosowanych dla osób niepełnosprawnych. Mogą one z powodzeniem być wykorzystane do napędu wszelkiego rodzaju urządzeń pomocniczych, pomagających wsiąść osobie niepełnosprawnej do samochodu czy też ułatwiających załadunek wózka do samochodu. Przykłady tego rodzaju zastosowań zostały przedstawione na rysunku 5.

Mikroukłady hydrostatyczne mogą mieć także zastosowanie w napędzie różnego rodzaju mechanizmów pomocniczych maszyn roboczych. Jako przykład podaje się podnoszoną kabinę platformy roboczej – rys. 6 – do napędu której wykorzystano elementy mikrohydrauliczne.

5. Zakłócenia występujące w układach hydraulicznych pracujących w warunkach rzeczywistych

Na elementy konwencjonalnego układu hydraulicznego pracującego w warunkach rzeczywistych działają różnego rodzaju sygnały zakłócające ich poprawną pracę. Prowadzi to do szeregu niekorzystnych skutków, wśród których jest powstawanie pulsacji ciśnienia o składowych odpowiadających częstotliwościom zewnętrznych drgań mechanicznych działających na wybrany element hydrauliczny (np. rozdzielacz). W następstwie oddziaływania zewnętrznych drgań mechanicznych, a pochodzących np. od ramy maszyny mobilnej, dochodzi do wzbudzenia się elementu sterującego zaworu hydraulicznego, co z kolei prowadzić może m.in. do pogorszenia dokładności pozycjonowania odbiorników hydraulicznych i podniesienia poziomu generowanego hałasu. Należy się spodziewać, że elementy mikrohydrauliczne będą w sposób szczególny narażone na negatywne działanie sygnałów zakłócających ich poprawną pracę, m.in.

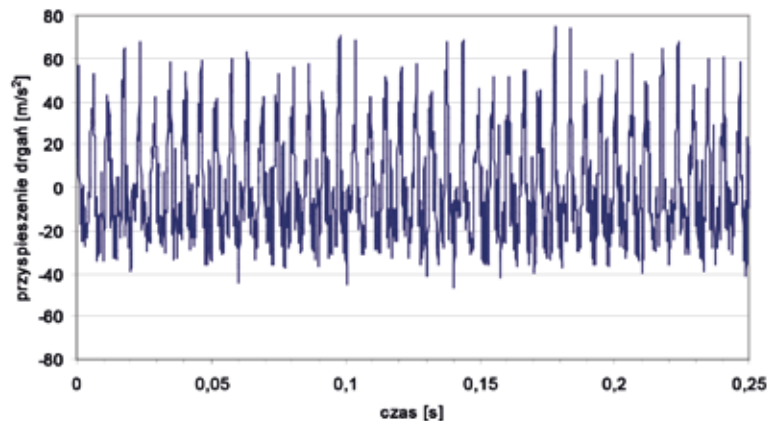
w postaci zewnętrznych drgań mechanicznych. Dlatego też w celu identyfikacji sygnałów zakłócających w postaci drgań mechanicznych przeprowadzono badania przyspieszenia drgań zbiornika zasilacza hydraulicznego – rys. 7 i 8 – wykonane w kierunku ruchu elementu sterującego zamontowanego na nim zaworu hydraulicznego. Ponadto wykazano, w pracach eksperymentalnych i studiach literaturowych, że w widmie przyspieszeń drgań maszyny roboczej wyposażonej w napęd hydrostatyczny obecne są składowe w szerokim spektrum częstotliwości [7, 8, 9, 10].

Jak widać na rys. 8, prócz dominującej składowej ok. 175 Hz w widmie przyspieszenia drgań znajdują się wyższe składowe harmoniczne.

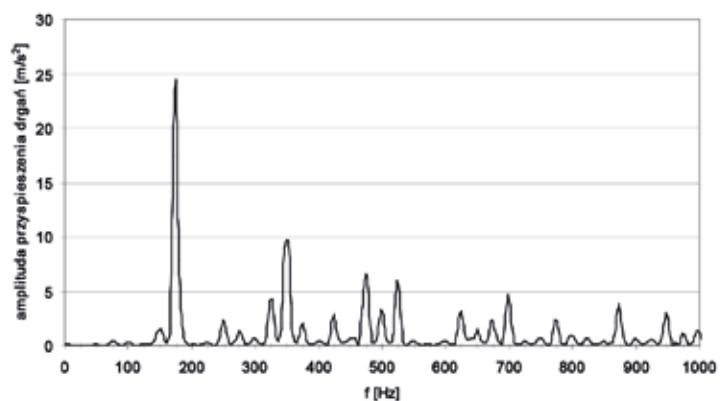
Również analiza widma z rysunku 10 wskazuje na występowanie drgań o składowych wyższych, które mogą szczególnie niekorzystnie oddziaływać na elementy układu mikrohydraulicznego, gdyż, jak należy się spodziewać, z powodu niewielkich mas częstotliwości rezonansowe elementów nastawiających tych mikrozaworów znajdować się mogą w wyższych zakresach.

6. Elementy mikrohydrauliczne zaprojektowane na Politechnice Wrocławskiej

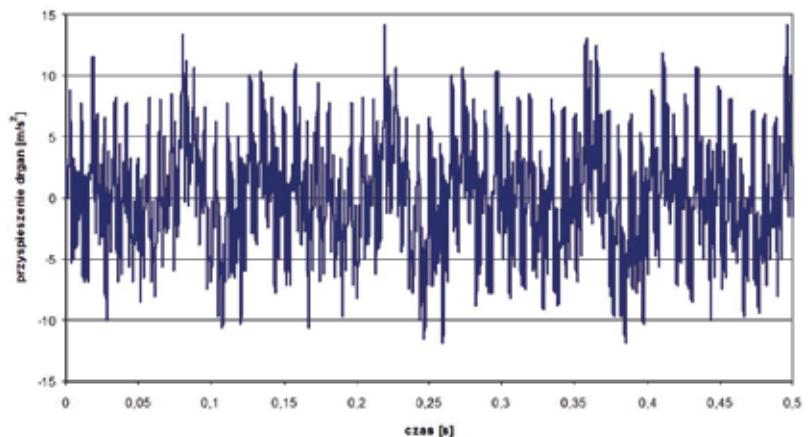
W Zakładzie Napędów i Automatyki Hydraulicznej zaprojektowano, a następnie wykonano elementy mikrohydrauliczne w postaci zaworu maksymalnego, zaworu zwrotnego, mikropompy zębatej oraz mikrozasilacza hydraulicznego. I tak, w ramach prac rozwojowych prowadzonych nad mikrohydrauliką na Politechnice Wrocławskiej, określono między innymi założenia techniczne i opracowano dokumentację konstrukcyjną typoszeregu mikropomp zębatych o zazębieniu zewnętrznym. W celu określenia tego typoszeregu wykorzystano, z jednej strony, stosowane w takich przypadkach rozwinięcie szeregu Fouriera, z drugiej natomiast strony przeanalizowano istniejące typoszeregi mikropomp wykonywanych przez znanych producentów. Rozpatrzono zatem typoszeregi mikropomp zębatych w agregatach A10 i AK3 prod. firmy Hoerbiger [6] oraz typoszereg mikropomp wielotłoczkowych osiowych serii PB33 ... PBV57,5 prod. firmy Hydro Leduc [5]. W oparciu o zgromadzone dane techniczne i eksploatacyjne produkowanych pomp opraco-



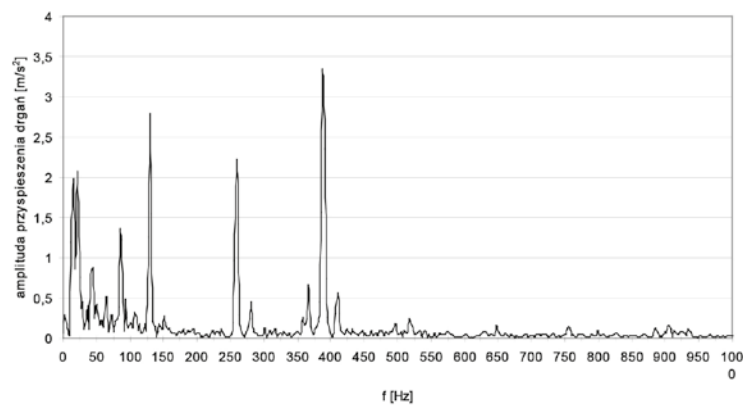
Rys. 7. Zarejestrowane przyspieszenie drgań płyty zbiornika zasilacza hydraulicznego. Prędkość obrotowa wału pompy: $n = 1450$ obr/min



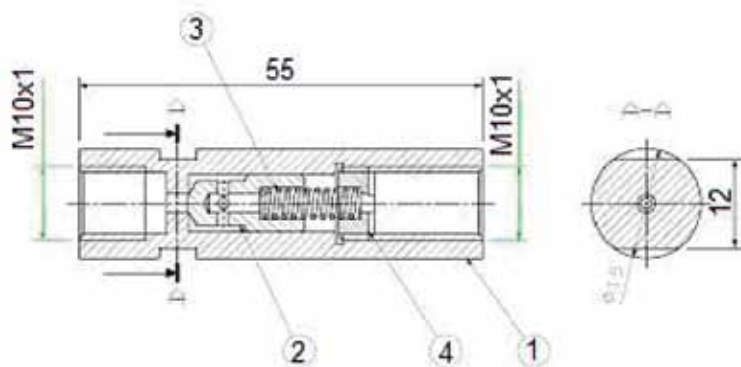
Rys. 8. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszenia drgań płyty zbiornika zasilacza hydraulicznego. Prędkość obrotowa wału pompy: $n = 1450$ obr/min



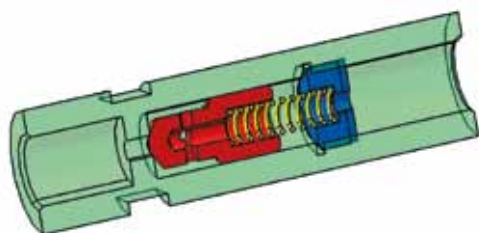
Rys. 9. Zarejestrowane przyspieszenie drgań płyty, na której zamontowano sterujące elementy hydrauliczne wózka widłowego. Prędkość obrotowa silnika napędowego: 800 obr/min



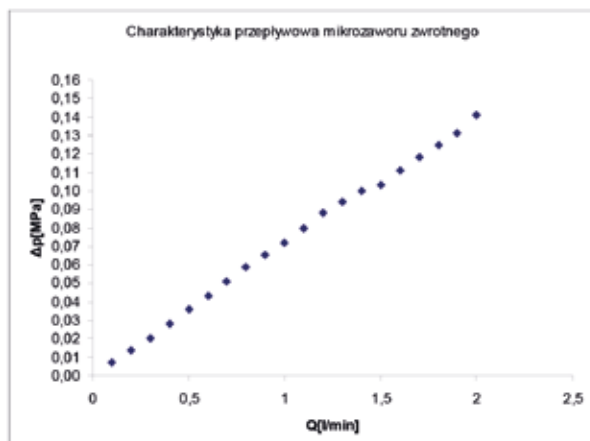
Rys. 10. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszenia drgań płyty montażowej wózka widłowego. Prędkość obrotowa silnika napędowego: 800 obr/min



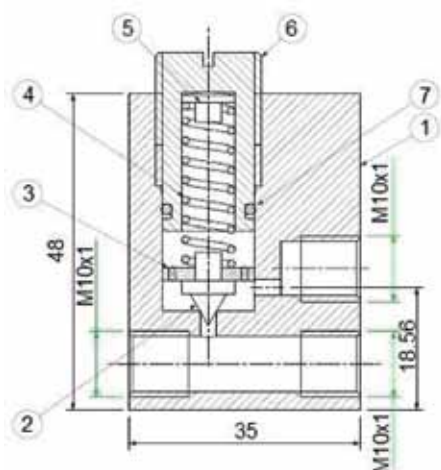
Rys. 11. Przekrój osiowy mikrozaworu zwrotnego: 1 – korpus; 2 – suwak; 3 – sprężyna; 4 – tuleja dystansowa



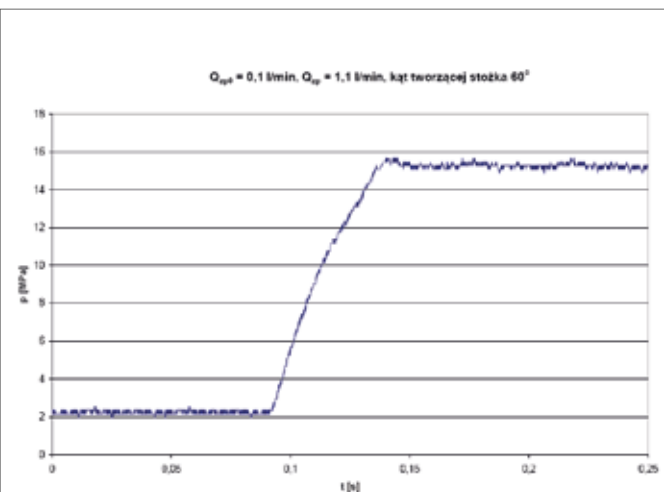
Rys. 12. Mikrozwór zwrotny. Przekrój osiowy mikrozaworu zwrotnego w formacie 3D



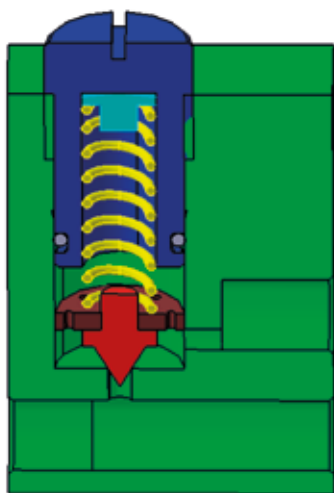
Rys. 13. Charakterystyka statyczna mikrozaworu zwrotnego



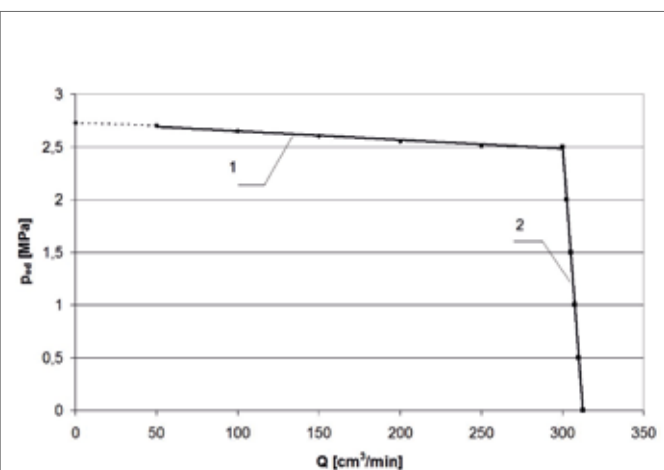
Rys. 14. Przekrój osiowy mikrozaworu maksymalnego: 1 – korpus; 2 – grzybek; 3 – tarcza tłumiąca; 4 – sprężyna; 5 – talerz; 6 – śruba nastawcza; 7 – uszczelka



Rys. 16. Charakterystyka skokowa mikrozaworu maksymalnego



Rys. 15. Mikrozawór maksymalny. Przekrój osiowy zaworu maksymalnego w formie 3D



Rys. 17. Charakterystyka mikrozasilacza hydraulicznego: 1 – charakterystyka zaworu bezpieczeństwa; 2 – charakterystyka mikropompy

wano założenia techniczne projektowanych mikropomp. Wydajność właściwą (geometryczną) w projektowanym typoszerzegu mikropomp zębatych o ząbieniu zewnętrznym przyjęto w zakresie $V_g = 0,1-1,2 \text{ cm}^3/\text{obr}$.

W związku z powyższym dalsze prace skoncentrowano na analizie geometrii ząbienia w aspekcie wydajności jednostkowej. W rozważaniach rozpatrywano jednostki, których objętość geometryczna jest zgodna z liczbowym ciągiem Renarda $R(i, b) = 10^{\frac{i}{b}}$ dla $i = 0, 1, 2, \dots, 10$ oraz $b = -10$. Szczegółowa analiza geometrii ząbienia z uwzględnieniem modułu kół wskazuje na dalszy podział zaproponowanego szeregu mikropomp na trzy podstawowe grupy, o objętościach geometrycznych V_g , tj.:

- grupa I: 0,1; 0,125; 0,16; 0,20;
- grupa II: 0,25; 0,315; 0,4; 0,5;
- grupa III: 0,6; 0,8; 1,0; 1,2.

Na rysunkach 11, 12, 14, 15 prezentuje się przekroje osiowe ww. mikroelementów hydraulicznych.

Przeprowadzono badania eksperymentalne mające na celu wyznaczenie charakterystyk statycznych i dynamicznych zaprojektowanych i wykonanych mikroelementów – przykładowa charakterystyka dynamiczna, jako odpowiedź zaworu maksymalnego na skokowe wymuszenie natężeniem przepływu, przedstawiona jest na rys. 16. Dzięki zastosowaniu odpowiednio zwymiarowanej tarczy tłumiącej (co jest przedmiotem wdrożonego postępowania patentowego i dlatego nie pokazano rozwiązania szczegó-

wego, poz. 3, rys. 14) zawór pracuje stabilnie w całym przewidzianym zakresie przepływu.

W Zakładzie zaprojektowano i wykonano mikrozasilacz hydrauliczny w oparciu o mikroelementy własnej konstrukcji: mikropompę zębatą o $q = 0,22 \text{ cm}^3/\text{obr}$ i prezentowany mikrozawór maksymalny. Mikrozasilacz ten był źródłem małych przepływów $< 0,3 \text{ dm}^3/\text{min}$.

Na rys. 17 przedstawiono charakterystykę badanego zasilacza.

Podczas próbnego uruchomienia mikrozasilacza stwierdzono nadmierny hałas i drgania pokrywy zbiornika cieczy roboczej. W ramach prac mających na celu wyciszenie pracy zasilacza podjęto próbę identyfikacji źródeł hałasu o najwyższym poziomie i wprowadzenie

zmian, które skutkowałyby obniżeniem poziomu hałasu globalnego. Próba taka została podjęta, opisana szeroko w [11], a jej efektem końcowym była redukcja poziomu dźwięku o ok. 15–17 dB(A).

7. Podsumowanie

Jak wskazano w referacie, mikrohydrauliczne elementy i układy zyskują coraz nowsze zastosowania, wypierając niejednokrotnie dotychczas stosowane napędy pneumatyczne czy elektro-mechaniczne. Nie oznacza to jednak, że obszar mikrohydrauliki nie posiada problemów, których źródła należy zidentyfikować i na drodze symulacyjnej i eksperymentalnej dążyć do ich wyeliminowania. Głównymi problemami w obszarze mikrohydrauliki, ograniczającymi ich szersze zastosowanie, są drgania mechaniczne oddziałujące na mikroelementy hydrauliczne oraz niekiedy znaczący poziom hałasu generowanego przez te układy. W związku z trudnościami badań zjawisk hydrodynamicznych w mikroelementach hydraulicznych badania eksperymentalne przeprowadza się czasami na elemencie modelowym większym od elementu roboczego i stosuje się kryteria podobieństwa. Jeśli natomiast to możliwe, badania eksperymentalne przeprowadza się na modelu identycznym (bądź bardzo zbliżonym) z elementem (np. mikrozaworem) roboczym. Aby mikroelementy i mikroukłady hydrauliczne mogły skutecznie konkurować z konwencjonalnymi układami, istnieje potrzeba prowadzenia dalszych prac, które dopro-

wadzić powinny do opracowania algorytmu projektowania mikroukładów hydraulicznych, spełniających postawione wymagania, dotyczące m.in. pewności i dokładności działania oraz obniżonej hałaśliwości.

Literatura

- [1] Dyrektywa nr 98/37/WE
- [2] ŁAWNICZAK A.: *Napędy hydrauliczne o małych prędkościach*. Politechnika Poznańska, Rozprawy Nr 154, Poznań 1988.
- [3] DINDORF R., WOŁKOW J.: *Mikroukłady płynowe. Warunki podobieństwa*. IX Konferencja „Badanie, konstrukcja, wytwarzanie, eksploatacja układów hydraulicznych – CYLINDER '99”, Zakopane 1999.
- [4] KASPRZAK W., LYSIK B.: *Analiza wymiarowa. Algorytmiczne procedury obsługi eksperymentu*, Warszawa 1988.
- [5] www.hydroeduc.com
- [6] www.hoerbiger.com
- [7] KOLLEK W., KUDŻMA Z., STOSIAK M.: *Propagacja drgań elementów nośnych maszyny roboczej ciężkiej*. „Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze”, 2/2008.
- [8] STOSIAK M.: *Oddziaływanie niskoczęstotliwościowych drgań mechanicznych podłoża na element sterujący zaworu hydraulicznego*. „Inżynieria Maszyn”, vol. 11, z. 2/3.
- [9] GRAJNERT J.: *Izolacja drgań w maszynach i pojazdach*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
- [10] ENGEL Z.: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, PWN, Warszawa 2001.
- [11] DOMAGAŁA T., KOLLEK W., KUDŻMA Z.: *Wibroakustyczna diagnostyka zasilacza hydraulicznego*. [W:] *Napędy i sterowania hydrauliczne '96*. Konferencja Naukowo-Techniczna. Szklarska Poręba, 11–13 czerwca 1996. Oficyna Wydawnicza PWR., Wrocław 1996.

prof. dr hab. inż. Wacław Kollek – Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska,
e-mail: wacław.kollek@pwr.wroc.pl
dr inż. Zygmunt Kudźma – Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska,
e-mail: zygmunt.kudźma@pwr.wroc.pl
mgr inż. Grzegorz Łomotowski – Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska,
e-mail: grzegorz.łomotowski@pwr.wroc.pl
dr inż. Michał Stosiak – Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska,
e-mail: michał.stosiak@pwr.wroc.pl

artykuł recenzowany