

Stanowisko do wyznaczania charakterystyk statycznych i dynamicznych zaworów proporcjonalnych

Zygmunt Kudźma, Michał Stosiak, Szymon Herok

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska

Streszczenie: W artykule przedstawiono stanowisko do wyznaczania charakterystyk statycznych i dynamicznych zaworów sterowanych w technice proporcjonalnej. Opisano układ sterujący rozdzielaczem proporcjonalnym i wielokanałowy tor sterująco-pomiarowy ze specjalistycznym oprogramowaniem umożliwiającym generowanie dowolnego w czasie przebiegu sygnału sterującego oraz na akwizycję danych pomiarowych. Przedstawiono przykładowe wyniki wyznaczania charakterystyk proporcjonalnego rozdzielacza regulacyjnego najnowszej generacji. Zamieszczono przykład zastosowania uzyskanych wyników pomiarowych do uściślenia modelu matematycznego sterowania rozruchem przekładni hydrostatycznej pod kątem minimalizacji hałasu.

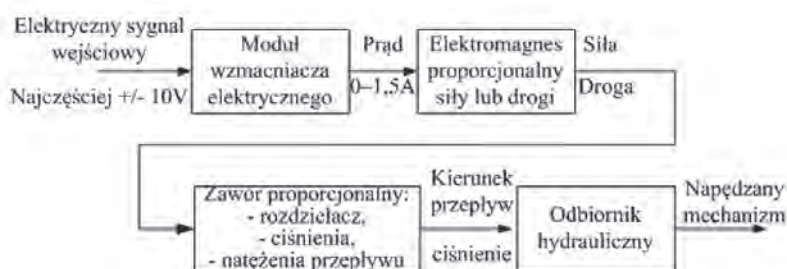
Słowa kluczowe: rozdzielacz proporcjonalny, sterowanie proporcjonalne, charakterystyki, przekładnia hydrostatyczna, badania

DOI: 10.14313/PAR_205/112

1. Wstęp

Układy hydrauliczne, mimo upływu lat, cieszą się niesłabnącą popularnością w wielu gałęziach przemysłu takich jak przemysł ciężki, górniczy, lotniczy, z racji szeregu zalet [1]. Wymusza to na producentach badania mające na celu ciągłą poprawę oferowanych produktów. Układy zbudowane wyłącznie z elementów hydraulicznych, często niezastąpione z uwagi na bezpieczeństwo przeciw-wybuchowe, są coraz częściej zastępowane przez elementy hydrauliczne sterowane sygnałem elektrycznym. Obserwuje się postępującą integrację elementów hydraulicznych, elektronicznych, sensorów oraz rozwiązań z zakresu informatyki a obszar, w któ-

rym to następuje nazywa się hydrotroniką [2, 3]. Dzięki zastosowaniu systemów elektronicznych w układach hydraulicznych, w ostatnich latach znacznie powiększył się obszar potencjalnych zastosowań, zwiększając konkurencyjność układów hydraulicznych w stosunku do innych [4]. Nie byłoby to możliwe, gdyby nie powstały nowoczesne elementy proporcjonalne. Elementy te cieszą się coraz większą popularnością, z powodu ogromnych możliwości, jakie daje sterowanie proporcjonalne. Możliwość zastosowania układów elektrohydraulicznych w układach regulacji automatycznej wymaga od elementów sterujących doskonałych parametrów dynamicznych [5]. Przykładem może być układ automatycznego pilota w samolotach. Podczas turbulencji można zauważyć ruchy lotek o wysokiej częstotliwości, korygujące w sposób automatyczny tor lotu. Elementy te sterowane są przez układy hydrauliczne wyposażone we wzmacniacze elektrohydrauliczne, które mogą przesterowywać się nawet kilkaset razy na sekundę. Powstające wciąż nowe rozwiązania, mające na celu polepszenie dynamicznych parametrów elementów hydraulicznych, pozwalają twierdzić, że układy hydrauliczne jeszcze przez długi czas będą podstawowymi elementami wykonawczymi wielu maszyn i urządzeń. Nieustannie prowadzone są prace nad poprawą właściwości dynamicznych i statycznych elementów i układów hydraulicznych. Dotyczy to również zwiększenia odpor-



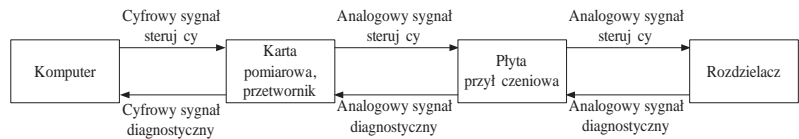
Rys. 1. Przebieg sygnałów w sterowaniu proporcjonalnym
Fig. 1. Signals run in proportional control technique

ności nowoczesnych zaworów hydraulicznych na warunki otoczenia pracy, takie jak drgania mechaniczne [6], temperatura, wilgoć.

Istotnym elementem nowoczesnych układów hydraulicznych bazujących na technice sterowania proporcjonalnego są rozdzielacze proporcjonalne pełniące w układzie kilka funkcji, m.in. sterowanie kierunkiem ruchu odbiornika hydraulicznego, płynne sterowanie prędkością ruchu odbiornika hydraulicznego, łagodzenie nadwyżek dynamicznych ciśnienia przez odpowiednie kształtowanie charakteru i czasu narastania sygnału sterującego [7–9]. W jednostopniowych rozdzielaczach proporcjonalnych stosowane są elektromagnesy proporcjonalne o regulowanym skoku, w odróżnieniu od elektromagnesów o regulowanej sile (stosowanych m.in. w zaworach ciśnieniowych) [3], dzięki czemu możliwe jest uzyskanie funkcyjnej zależności położenia suwaka w funkcji napięcia sterującego (rys. 1).

W sterowaniu konwencjonalnym, z racji odmiennej budowy części sterującej, uzyskanie proporcjonalności jest niemożliwe. W związku z przytoczonym faktem, przemieszczenie suwaka wywołane takim samym sygnałem sterującym w przypadku obu elementów jest różne. W obu przypadkach mamy do czynienia ze sterowaniem ciągłym w czasie, przy czym przemieszczenie suwaka rozdzielacza konwencjonalnego typu 4/3 osiąga wartości dyskretne (3 położenia). Z tego względu do sterowania układów konwencjonalnych używa się prostych sygnałów napięciowych o dyskretnej amplitudzie. Przesunięcie suwaka rozdzielacza proporcjonalnego przyjmuje wartości ciągłe, zarówno w czasie, jak i amplitudzie. Oznacza to, że suwak również może przyjmować dowolne położenia z zakresu od minimum do maksimum, przy czym zakres ten jest wielkością konstrukcyjną danego rozdzielacza.

Właściwości statyczne i dynamiczne rozdzielaczy proporcjonalnych opisywane są przez szereg parametrów. Do najważniejszych należą m.in.: histereza, czułość progowa, częstotliwość graniczna [10, 11]. Ponadto na charakterystykę pracy rozdzielacza proporcjonalnego wpływ ma przekrycie spoczynkowe, które w tego typu zaworach jest zazwyczaj dodatnie. Przez histerezę, w odniesieniu do rozdzielacza proporcjonalnego, rozumie się największą różnicę prądu sterującego, przy której suwak osiąga to samo położenie, odniesioną do wartości mniejszego z prądów. Wartości histerezy podaje się w procentach, typowo dla rozdzielaczy proporcjonalnych wynosi ona od 3 % do 6 %. Czułość progowa rozdzielacza określa najmniejszą zmianę sygnału wejściowego, przy której następuje zmiana położenia suwaka. Natomiast częstotliwość graniczna, oznacza częstotliwość sygnału wymuszającego, przy której odpowiedź zaworu jest tłumiona o 3 dB. Typowa wartość tego parametru dla rozdzielaczy proporcjonalnych wynosi 6–10 Hz, a w rozdzielaczach proporcjonalnych regulacyjnych dochodzi do ok. 80 Hz [12].



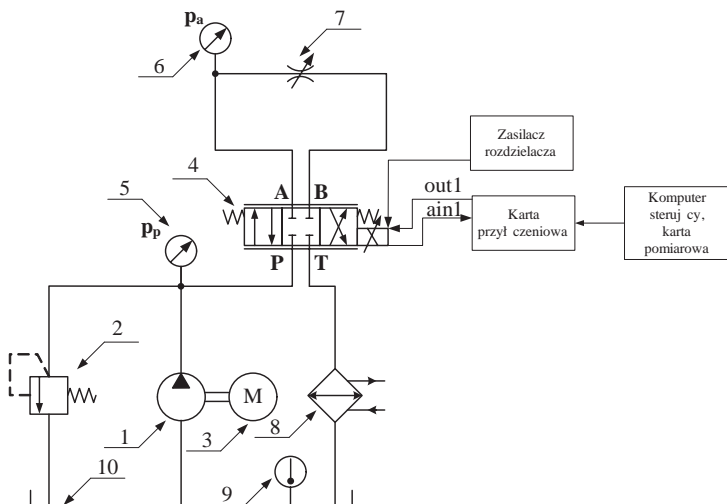
Rys. 2. Schemat blokowy układu sterującego oraz diagnostycznego badanego zaworu proporcjonalnego

Fig. 2. Block diagram of control system and diagnosis system of tested proportional valve

2. Stanowisko badawcze

Zbudowano stanowisko badawcze, które umożliwiała wyznaczanie charakterystyk statycznych i dynamicznych zaworów hydraulicznych sterowanych w technice proporcjonalnej. Stanowisko realizuje następujące funkcje: formuje dowolnie zmienny w czasie przebieg sygnału sterującego, zbiera sygnał pomiarowy w postaci zmiennych w czasie przebiegów sygnału elektrycznego na maksymalnie 8 kanałach równocześnie. Ponadto stanowisko badawcze, dzięki specjalnie opracowanemu oprogramowaniu, umożliwia dowolną konfigurację interfejsu użytkownika, pozwalając m.in. na osadzanie w oknie głównym wybranych przyrządów kontrolnych (np. manometrów). Do badań doświadczalnych wybrano jednostopniowy rozdzielacz proporcjonalny Parker-Hannifin o symbolu D1FPE01MC9NB00. Zgodnie z notą katalogową [13] jest to rozdzielacz 4/3 sterowany bezpośrednio z suwakiem o przekryciu spoczynkowym dodatnim. Przy zaniku zasilania suwak, za pomocą sprężyn, przyjmuje pozycję środkową oznaczającą odcięcie wszystkich dróg. Zawór sterowany jest napięciem ± 10 V, które doprowadzane jest do elementu przez 7-pinowe złącze (6 pinów sygnałowych + PE). Rozdzielacz zasilany jest napięciem 22–30 V przy maksymalnym poborze prądu równym 3,5 A. Rozdzielacz wyposażono w zintegrowaną elektronikę sterującą i sprzężenie zwrotne położenia suwaka. Rozdzielacz został wykonany w technologii VCD (ang. *Voice Coil Drive*). Oznacza to, że w odróżnieniu od konwencjonalnych konstrukcji rozdzielaczy proporcjonalnych, na suwak oddziałuje nie rdzeń elektromagnesu, lecz ruchoma cewka [14]. Dzięki tej technologii uzyskano istotną poprawę parametrów dynamicznych zaworu z powodu znacznego zmniejszenia masy ruchomej. Zgodnie z danymi producenta [13] badany rozdzielacz cechował się następującymi parametrami: histereza $< 0,05$ %, częstotliwość graniczna przy 5 % sygnału sterującego 350 Hz przy tłumieniu amplitudy o 3 dB.

W celu sterowania badanym zaworem proporcjonalnym, w tym przypadku rozdzielaczem proporcjonalnym, zbudowano układ sterujący z przetwornikiem C/A, przetwarzający cyfrowy sygnał z komputera na wartości analogowe wymagane przez rozdzielacz. Do diagnostyki rozdzielacza konieczny jest przetwornik A/C, przetwarzający analogowy sygnał diagnostyczny rozdzielacza na sygnał cyfrowy, możliwy do akwizycji za pomocą komputera. W tym celu zastosowano kartę pomiarową firmy IOtech, model DaqBoard2000.



Rys. 3. Schemat układu hydraulicznego do pomiaru charakterystyk dynamicznych rozdzielacza proporcjonalnego: 1 – pompa, 2 – zawór maksymalny, 3 – silnik elektryczny, 4 – badany rozdzielacz proporcjonalny, 5, 6 – manometry cyfrowe, 7 – nastawny zawór dławiący, 8 – chłodnica oleju, 9 – termometr, 10 – zbiornik oleju

Fig. 3. Scheme of hydraulic system for dynamic characteristics measurement of directional proportional control valve: 1 – pump, 2 – maximal valve, 3 – electric motor, 4 – proportional directional control valve, 5, 6 – digital pressure gauges, 7 – adjustable throttle valve, 8 – oil cooler, 9 – thermometer, 10 – oil tank

Karta ta wyposażona jest w analogowe moduły wejść i wyjść, dzięki czemu możliwe jest zarówno sterowanie rozdzielaczem, jak i odczyt danych diagnostycznych. Do połączenia karty pomiarowej z zaworem użyto płyty przyłączeniowej DKB202 oraz 7-pinowego ekranowanego przewodu sygnałowego.

Zastosowana karta pomiarowa ma 8 wejść analogowych, rozdzielczość 16 bitów, maksymalną częstotliwość próbkowania 200 kS/s, 2 wyjścia analogowe i 40 wyjść cyfrowych oraz możliwość generowania przebiegu sygnału sterującego z pamięci RAM komputera.

Na potrzeby obsługi stanowiska zbudowano i wykorzystano specjalistyczne oprogramowanie HydroSter. Oprogramowanie to umożliwia przesyłanie zadanego sygnału sterującego z komputera do rozdzielacza oraz odczytywanie sygnału diagnostycznego (pochodzącego z czujnika położenia suwaka rozdzielacza) lub sygnału z toru tensometrycznego przetwornika ciśnienia. Szerzej opisano strukturę oraz działanie programu w pracy [8].

Oprogramowanie HydroSter ma wbudowany generator sygnałów sterujących, umożliwia również zadanie sinusoidalnego sygnału, dzięki czemu nie ma potrzeby ich generowania za pomocą dodatkowego oprogramowania.

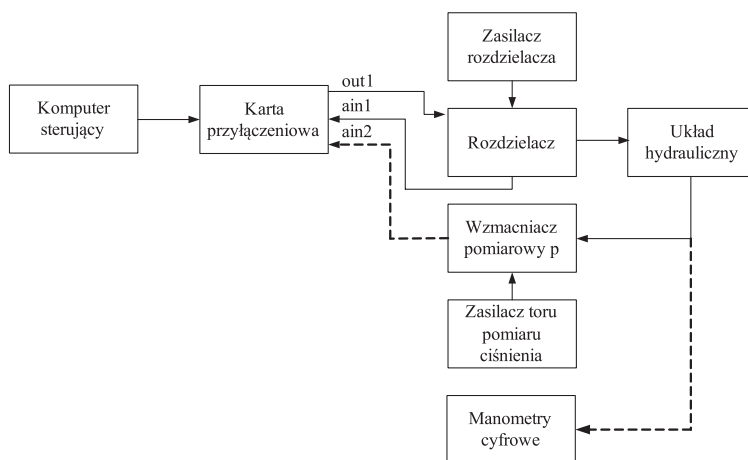
Do badania charakterystyk dynamicznych posłużono się układem hydraulicznym (rys. 3), w skład którego wchodzi następujące podzespoły:

- zębata pompa wyporowa o stałej wydajności,
- zawór maksymalny,
- badany rozdzielacz proporcjonalny D1FPE01MC9NB00,
- nastawny zawór dławiący,
- manometry cyfrowe.

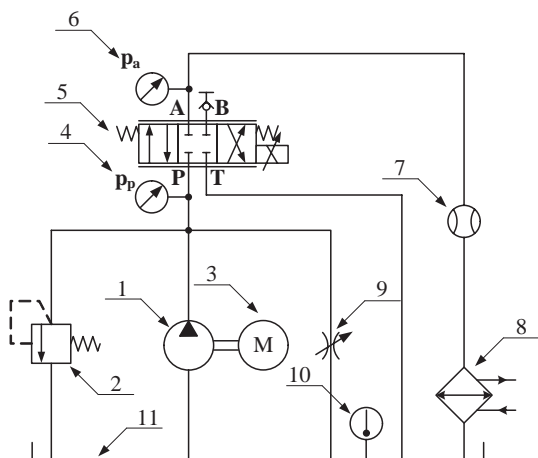
Czynnik roboczy doprowadzany jest do rozdzielacza przez zębatą pompę wyporową o stałej wydajności. Pompa z bocznikowa jest zaworem maksymalnym, który pełni rolę zaworu przelewowego. Obciążeniem badanego rozdzielacza jest nastawny zawór dławiący. Kontrola ciśnienia w wybranych punktach, w trakcie sterowania rozdzielaczem, była prowadzona za pomocą manometrów cyfrowych.

Aby umożliwić poprawną pracę układu, niezbędne jest zbudowanie odpowiedniego toru sterująco-pomiarowego, (rys. 4). W skład układu elektrycznego wchodzi następujące elementy:

- komputer sterujący z wbudowaną kartą pomiarową,
- karta przyłączeniowa,
- zasilacz rozdzielacza,
- wzmacniacz pomiarowy tensometrycznego czujnika ciśnienia,
- zasilacz wzmacniacza pomiarowego czujnika tensometrycznego,
- manometry cyfrowe.



Rys. 4. Schemat blokowy toru sterująco-pomiarowego
Fig. 4. Block diagram of control-measurement line



Rys. 5. Schemat hydrauliczny do pomiaru charakterystyki statycznej $\Delta p = f(Q)$ dla $x = \text{const}$: 1 – pompa, 2 – zawór maksymalny, 3 – silnik elektryczny, 4 – tensometryczny czujnik ciśnienia, 5 – badany rozdzielacz proporcjonalny, 6 – manometr cyfrowy, 7 – przepływomierz, 8 – chłodziła oleju, 9 – nastawny zawór dławiący, 10 – termometr, 11 – zbiornik oleju

Fig. 5. Hydraulic scheme for static characteristic measurement $\Delta p = f(Q)$ for $x = \text{const}$: 1 – pump, 2 – maximal valve, 3 – electric motor, 4 – tensometric pressure sensor, 5 – proportional directional control valve, 6 – digital pressure gauge, 7 – flowmeter, 8 – oil cooler, 9 – adjustable throttle valve, 10 – thermometer, 11 – oil tank

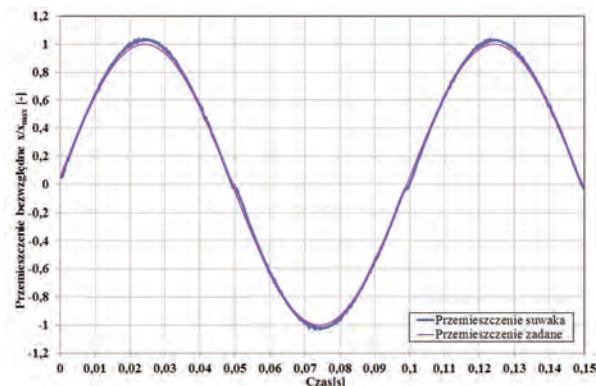
Generowany w programie HydroSter sinusoidalny sygnał sterujący o ustalonej amplitudzie i częstotliwości podawany był na rozdzielacz, z którego zbierano sygnał diagnostyczny położenia suwaka.

Do wyznaczenia charakterystyk statycznych badanego rozdzielacza wykorzystano układ hydrauliczny (rys. 5). Umożliwił on wyznaczenie podstawowej charakterystyki $\Delta p = f(Q)$ dla $x = \text{const}$, przy czym, dla drogi przepływu $P \rightarrow A$, spadek ciśnienia na szczelinie rozdzielacza wobec tego, że $p_p \gg p_a$, wynosi $\Delta p = p_p - p_a \approx p_p$. Na podstawie tej charakterystyki można było zbudować charakterystyki: $\Delta p = f(x)$ dla $Q = \text{const}$ i $Q = f(x)$ dla $\Delta p = \text{const}$.

Podczas badań statycznych do sterowania rozdzielaczem wykorzystano taki sam tor jak dla badań dynamicznych (rys. 4), natomiast ciśnienie p_p było mierzone przetwornikiem tensometrycznym o znanej charakterystyce, a wartość ciśnienia p_a kontrolowano za pomocą manometru cyfrowego. Czynnikiem roboczym był olej mineralny HL 68 o temperaturze 25 °C.

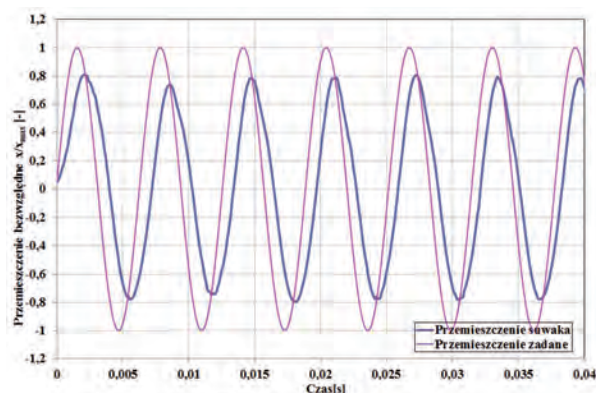
3. Wyniki pomiarów statycznych i dynamicznych

Pomiary charakterystyk dynamicznych prowadzono dla czterech wartości amplitudy sygnału sterującego: 25 %, 50 %, 90 % i 100 %. Ponieważ maksymalne napięcie sygnału sterującego równe jest 10 V, amplitudy te przyjmują wartość napięć odpowiednio 2,5 V, 5 V, 9 V oraz 10 V.



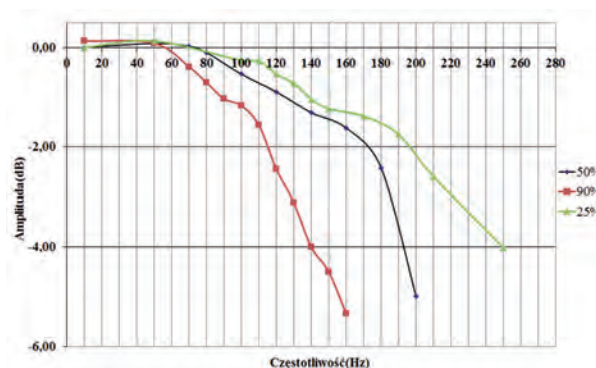
Rys. 6. Przebieg czasowy przemieszczenia suwaka dla sinusoidalnego sygnału sterującego o amplitudzie 5 V i częstotliwości 10 Hz

Fig. 6. Time course of slider displacement for sinusoidal control signal for amplitude 5 V and frequency 10 Hz



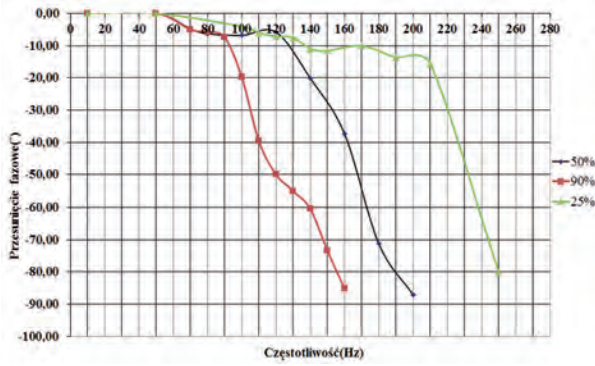
Rys. 7. Przebieg czasowy przemieszczenia suwaka dla sinusoidalnego sygnału sterującego o amplitudzie 5 V i częstotliwości 160 Hz

Fig. 7. Time course of slider displacement for sinusoidal control signal for amplitude 5 V and frequency 160 Hz



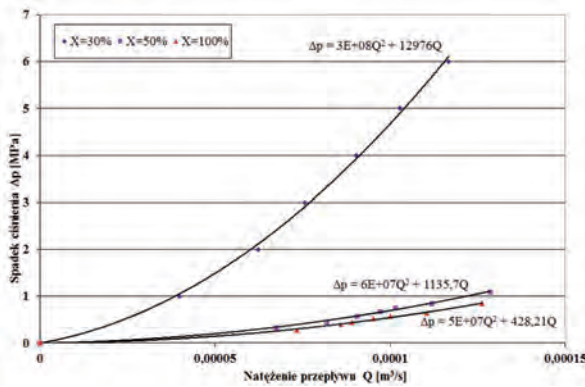
Rys. 8. Charakterystyka amplitudowa przy wymuszeniu o amplitudzie 2,5 V, 5 V i 9 V

Fig. 8. Amplitude characteristic for amplitude of control signal 2.5 V, 5 V and 9 V



Rys. 9. Charakterystyka fazowa przy wymuszeniu o amplitudzie 2,5 V, 5 V i 9 V

Fig. 9. Phase characteristic for amplitude of control signal 2.5 V, 5 V and 9V



Rys. 10. Zależność spadku ciśnienia (na drodze P→A) na rozdzielaczu w funkcji natężenia przepływu dla stałych wartości położenia suwaka

Fig. 10. Dependence of pressure drop (P→A) in function of valve flow rate for fixed values of slider displacement

Z uwagi na fakt, iż badany rozdzielacz miał dodatnie przekrycie spoczynkowe, to przy założeniu braku przecieków wewnętrznych, ciecz płynie przez niego, gdy na wejście podane zostanie napięcie 2,5 V lub większe. Badania charakterystyk dynamicznych wykonano w taki sposób, że częstotliwości sygnałów sterujących zaczynały się od wartości, w której nie występuje tłumienie ani przesunięcie fazowe i były sukcesywnie zwiększane do momentu, w którym odpowiedź rozdzielacza była wytłumiona względem sygnału sterującego o więcej niż 3 dB. Na rys. 6 i 7 przedstawiono przykładowe wyniki badań w postaci przebiegu czasowego sygnału sterującego i przemieszczenia suwaka rozdzielacza dla wybranych parametrów częstotliwości i amplitudy sygnału sterującego.

Jak wykazały badania, których wyniki przykładowe przedstawiono na rys. 8, odpowiedź zaworu jest wytłumiona o około 1,4 dB, a przesunięcie fazowe wynosi 37,4° przy częstotliwości 160 Hz.

Przeprowadzone badania doświadczalne na zbudowanym stanowisku pozwoliły na wyznaczenie charakterystyki amplitudowej oraz fazowej badanego rozdzielacza proporcjonalnego dla zadanych parametrów sygnału sterującego. Charakterystyki amplitudowe uzyskano przez określenie, na podstawie pomiarów maksymalnej i minimalnej wartości odpowiedzi, w stanie ustalonym i podzielenie sumy tych wartości przez znaną wartość sygnału sterującego. Zastosowano w tym przypadku ogólnie znaną zależność:

$$A = 20 \log \left(\frac{X_{max} + X_{min}}{A_0} \right) \tag{1}$$

gdzie: X_{max} – maksymalna wartość przemieszczenia suwaka, X_{min} – minimalna wartość przemieszczenia suwaka, A_0 – amplituda sygnału wymuszającego.

Wartość kąta przesunięcia fazowego otrzymano przez wyznaczenie czasu opóźnienia sygnału badanego względem sygnału wymuszającego. Przy znanej częstotliwości, przesunięcie fazowe można obliczyć z zależności (2):

$$\varphi = 360tf \tag{2}$$

gdzie: t – wyznaczona wartość opóźnienia sygnału, f – częstotliwość sygnału wymuszającego

Obliczone wartości zobrazowano na wykresie, na którym oś odciętych stanowi częstotliwość sygnału wymuszającego (rys. 8 i 9).

Układ osiąga tłumienie równe -3 dB przy częstotliwości około 185 Hz. Przesunięcie fazowe równe 90° znajduje się w okolicach 200 Hz.

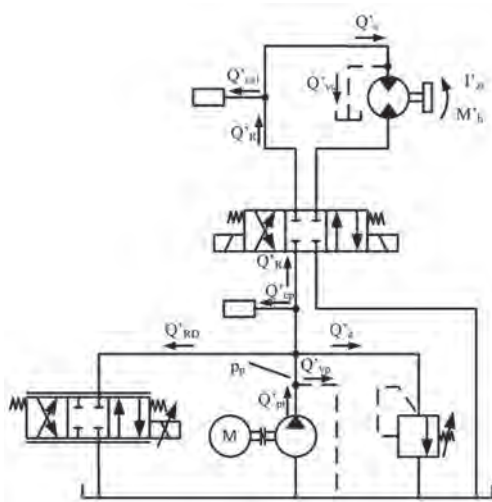
Charakterystykę statyczną spadku ciśnienia w funkcji natężenia przepływu, przy znanej wartości położenia suwaka, można uzyskać stosując układ przedstawiony na rys. 5. Pomiary przeprowadzono dla trzech różnych położenia suwaka, wynoszących 30 %, 50 % oraz 100 %, a wyniki przedstawiono na rys. 10. Do pomiaru ciśnienia użyto przetwornika tensometrycznego ciśnienia, natomiast wartość objętościowego natężenia przepływu mierzono przepływomierzem turbinkowym wzorcowanym metodą objętościową z przedziałem ufności na poziomie 1 %.

Wyniki badań statycznych potwierdzają analizy teoretyczne strat przepływu przez rozdzielacz opisane zależnością [1]:

$$\Delta p = \frac{\rho Q^2}{2k_v A^2} \tag{3}$$

gdzie: ρ – gęstość cieczy, Q – natężenie przepływu, k_v – współczynnik oporu przepływu, A – pole przekroju przepływu.

Na podstawie przeprowadzonych badań statycznych i wyznaczonej charakterystyki $\Delta p = f(Q)$ dla $x = \text{const}$, za pomocą równań linii trendu (rys. 10), można obliczyć, a następnie wyznaczyć pozostałe charakterystyki $\Delta p = f(x)$ dla $Q = \text{const}$. oraz $Q = f(x)$ dla $\Delta p = \text{const}$.



Rys. 11. Schemat układu hydraulicznego przekładni hydrostatycznej ze sterowaniem dławieniowym równoległym: Q'_{pt} – wydajność teoretyczna pompy, Q'_{vp} – straty przecieków pompy, Q'_z – przepływ przez zawór maksymalny, Q'_{RD} – przepływ przez zawór proporcjonalny, Q'_{cp} – przepływ wywołany ściśliwością w objętości układu pomiędzy pompą a rozdzielacz sterujący kierunkiem ruchu, Q'_R – przepływ przez rozdzielacz sterujący kierunkiem ruchu, Q'_S – przepływ do silnika hydrostatycznego, Q'_{vs} – straty przecieków silnika hydrostatycznego, Q'_{cs1} – przepływ wywołany ściśliwością w objętości układu pomiędzy rozdzielacz sterujący kierunkiem ruchu silnika a silnikiem hydrostatycznym

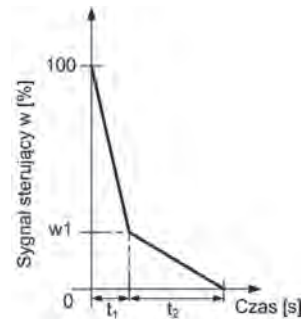
Fig. 11. Scheme of hydraulic system of hydrostatic transmission for parallel-throttle speed control method: Q'_{pt} – theoretical pump capacity, Q'_{vp} – pump volumetric losses, Q'_z – maximal valve flow rate, Q'_{RD} – proportional valve flow rate, Q'_{cp} – flow rate resulting from system capacity between pump and directional control valve, Q'_R – directional control valve flow rate, Q'_S – hydrostatic motor flow rate, Q'_{vs} – hydrostatic motor volumetric losses, Q'_{cs1} – flow rate resulting from system capacity between directional control valve and hydrostatic motor

4. Przykład zastosowania układu sterująco-pomiarowego

Zaproponowany układ sterująco-pomiarowy i wyniki badań rozdzielacza proporcjonalnego pozwoliły uściślić model matematyczny rozruchu przekładni hydrostatycznej zbudowanej z jednostek nienastawialnych oraz zaproponować algorytm sterowania ze względu na minimum emitowanego hałasu. W tym celu zbudowano stanowisko przekładni hydrostatycznej, na bazie jednostek zębatych, sterowanej dławieniowo równolegle. Sterowanie dławieniowo równoległe polega na umieszczeniu w przewodzie równoległym do przewodu głównego nastawnego zaworu dławiącego i zmianie wielkości szczeliny przepływowej w tym zaworze. W badanej przekładni elementem zmieniającym szczelinę przepływu w przewodzie równoległym był badany rozdzielacz proporcjonalny.

Wyznaczone właściwości dynamiczne rozdzielacza proporcjonalnego wskazują, że będzie on skuteczny w procesie łagodzenia nadwyżek dynamicznych ciśnienia decydujących w znacznym stopniu o poziomie emitowanego hałasu. Rozpatrzono układ hydrauliczny, którego schemat przedstawiono na rys. 11. Dokładny opis i sposób obciążenia badanej przekładni zamieszczono w [15]. Uzyskane wyniki badań doświadczalnych porównano z wynikami symulacji komputerowych modeli [7, 16].

Wykorzystując zbudowane stanowisko wygenerowano przebiegi sygnału sterującego zmiennego w czasie, które podawane były na rozdzielacz proporcjonalny. W tym przypadku przebieg sygnału sterującego miał postać skokową oraz taką jak przedstawiono na rys. 12.



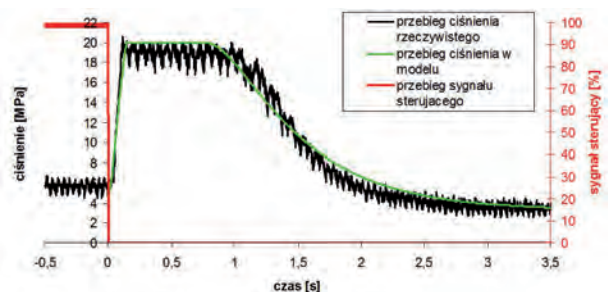
Rys. 12. Przebieg sygnału sterującego zaworem proporcjonalnym dla sterowania dławieniowego równoległego

Fig. 12. Control signal course of proportional valve for parallel-throttle speed control method

W sygnale sterowania wyróżnić można czasy t_1 , t_2 i współczynnik sterowania w wynoszący:

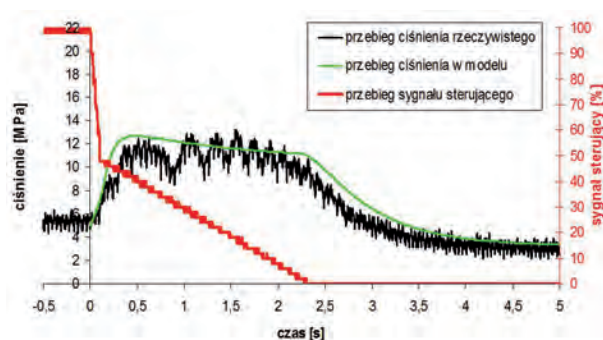
$$w = \frac{i - i_{min}}{i_{max} - i_{min}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

gdzie: i – prąd sterowania, i_{max} – maksymalna wartość prądu sterowania, i_{min} – minimalna wartość prądu sterowania.



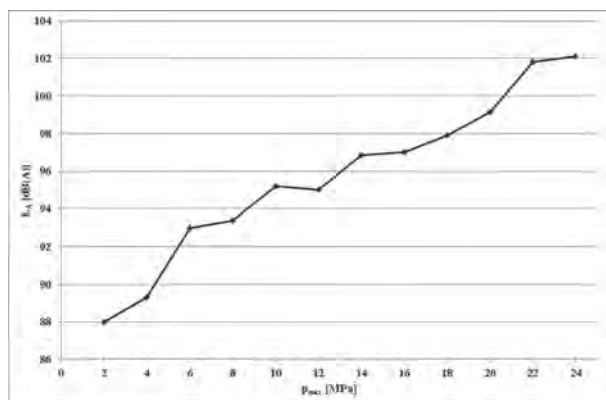
Rys. 13. Przebieg doświadczalny i symulacyjny zmian ciśnienia podczas rozruchu przekładni hydrostatycznej dla skokowej zmiany sygnału sterującego

Fig. 13. Experimental and simulation course of pressure changes during hydrostatic transmission starting for input step function



Rys. 14. Przebieg doświadczalny i symulacyjny zmian ciśnienia podczas rozruchu przekładni hydrostatycznej dla zmiany sygnału sterującego wg zależności (4) i wskaźnika sygnału sterującego $w_1 = 55\%$

Fig. 14. Experimental and simulation course of pressure changes during hydrostatic transmission starting for input signal change according to formula (4) and control signal coefficient $w_1 = 55\%$



Rys. 15. Zależność skorygowanego poziomu ciśnienia akustycznego L_A od wartości ciśnienia maksymalnego p_{max} w trakcie rozruchu badanej przekładni hydrostatycznej [16]

Fig. 15. Dependence of corrected acoustic pressure level L_A on value of maximal pressure p_{max} during starting of tested hydrostatic transmission [16]

Do sterowania zaworem typu D1FP wykorzystano program HydroSter, napisany w języku C#, przeznaczony specjalnie do tworzenia dowolnych przebiegów sygnału sterującego. Wyniki badań doświadczalnych w postaci przebiegu ciśnienia przy pompie podczas rozruchu przekładni dla skokowej zmiany sygnału sterującego przedstawiono na rys. 13, na tle wyników badań symulacyjnych [16] i uzupełniono przebiegiem sygnału sterującego rozdzielaczem proporcjonalnym.

W oparciu o zbudowane stanowisko wygenerowano inny przebieg sygnału sterującego (rys. 12). Rezultaty stosowania takiego sygnału sterującego przedstawiono na rys. 14 – przebieg ciśnienia przy pompie podczas rozruchu przekładni. Na rys. 14 przedstawiono dla porównania wyniki badań symulacyjnych [16] oraz przebieg sygnału sterującego rozdzielaczem proporcjonalnym.

Podczas rozruchu za pomocą sterowania dławieniowego równoległego pompa pracuje przy niższym ciśnieniu niż podczas rozruchu za pomocą sterowania dławieniowego szeregowego [7]. Jak wykazały badania własne [17, 18] najbardziej hałaśliwym elementem układu hydraulicznego jest pompa wyporowa. Poziom generowanego hałasu przez nią zależy od jej obciążenia, zatem obniżenie ciśnienia podczas np. rozruchu przekładni hydrostatycznej prowadzi do obniżenia wartości skorygowanego poziomu ciśnienia akustycznego L_A (rys. 15) całego układu.

Podsumowanie

Opracowano koncepcję i zbudowano stanowisko do określenia podstawowych parametrów dynamicznych i statycznych rozdzielaczy proporcjonalnych. Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły uściślić i sparametryzować model matematyczny rozruchu przekładni hydrostatycznej sterowanej dławieniowo równolegle lub szeregowo. Zbudowane stanowisko pozwala wyznaczyć charakterystyki statyczne i dynamiczne dla dowolnej dopuszczalnej, amplitudy sygnału sterującego, podczas gdy dane katalogowe prezentują charakterystyki wyłącznie dla wybranych wartości amplitud sygnału sterującego (np. podstawowa charakterystyka $Q = f(u)$ dla badanego rozdzielacza proporcjonalnego przedstawiona jest w karcie katalogowej wyrobu [13]). Pozwala to na uściślenie opisu zaworu proporcjonalnego dla konkretnej aplikacji w układzie hydraulicznym o ustalonych parametrach eksploatacyjnych. Badać można też inny zawór proporcjonalny lub wzmacniacz elektrohydrauliczny wyposażony w napięciowe wyjście diagnostyczne położenia elementu sterującego (np. suwaka, grzybka).

Zaprezentowane stanowisko może być wykorzystane w układach pulsacyjnych, w których niezbędny jest szeroki zakres generowanych pulsacji wydajności i ciśnienia. W szczególności może być przydatne do badań wpływu przepływów pulsacyjnych w elementach i układach mikrohydraulicznych, w których z racji niewielkich mas elementów sterujących występują wysokie wartości częstotliwości drgań własnych tychże elementów, rzędu kilkuset Hz [19].

Bibliografia

1. Stryczek S., *Napęd hydrostatyczny*, WNT, Warszawa 1996.
2. Dindorf R., *Hydrotronika tendencją w rozwoju hydrauliki*. Konferencja Naukowo-Techniczna „Napędy i Sterowania Hydrauliczne’2002”. Wrocław 2002.
3. Osiecki A., *Hydrostatyczny Napęd Maszyn*. WNT, Warszawa 1998.
4. Praca zbiorowa pod redakcją Szlagowski J., *Automatyzacja pracy maszyn roboczych. Metodyka i zastosowania*. WKŁ, Warszawa 2010.
5. Pizoń A., *Elektrohydrauliczne analogowe i cyfrowe układy automatyki*. WNT, Warszawa 1995.

6. Stosiak M., *Vibration insulation of hydraulic system control components*. "Archives of Civil and Mechanical Engineering" Vol. 11, 1/2011, 237–248.
7. Kudźma Z., Stosiak M., *Wpływ metod sterowania dławieniowego na hałaśliwość przekładni hydrostatycznej*. „Hydraulika i Pneumatyka” 1/2013, 21–25.
8. Kudźma Z., *Tłumienie pulsacji ciśnienia i hałasu w układach hydraulicznych w stanach przejściowych i ustalonych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
9. Tomasiak E., Klarecki K., *Stosowanie techniki sterowania proporcjonalnego*. „Napędy i Sterowanie” 10/2008, 118–124.
10. Szydelski Z., *Pojazdy samochodowe. Napęd i sterowanie hydrauliczne*. WKŁ, Warszawa 1999.
11. Tomczyk J., *Modele dynamiczne elementów i układów napędów hydrostatycznych*. WNT, Warszawa 1999.
12. Tomasiak E., *Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
13. [www.parker.com/literature/Hydraulic%20Controls%20Europe/Manuals%20UK/D_FP%20HY11-5175-591%20UK.pdf] – Parker Hannifin (10.08.2013).
14. Kolvenbach H., Krips W., *Revolution in Dynamik und Kraft: Neue Antriebstechnologie fur Stetigventile*. 4th International Fluid Power Conference “Intelligent Solutions by Fluid Power”. Dresden 2004.
15. Kudźma Z., Stosiak M., *Praktyczne sposoby ograniczenia hałaśliwości układów hydrostatycznych podczas rozruchu*. „Hydraulika i Pneumatyka” 5/2013, 18–23.
16. Kudźma Z., Łomotowski G., *Sterowanie rozruchem przekładni hydrostatycznej pod kątem minimalizacji hałasu*. „Hydraulika i Pneumatyka” 3/2009, 5–10.
17. Kudźma Z., *Obniżenie hałasu przekładni hydrostatycznej podczas rozruchu*. „Hydraulika i Pneumatyka” 6/2001, 5–8.
18. Fiebig W., Kudźma Z., *Rozruch przekładni hydrostatycznej z udziałem zaworu maksymalnego*. „Sterowanie i Napęd Hydrauliczny” 6/1990, 3–7.
19. Kudźma Z., Stosiak M., *Eksperymentalne określenie wpływu drgań mechanicznych na przebiegi ciśnienia w wybranych układach mikrohydraulicznych*, [w:] praca zbiorowa pod redakcją Kollek W., *Podstawy projektowania, modelowania, eksploatacji elementów i układów mikrohydraulicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011. ■

Test stand for estimation of static and dynamic characteristic of proportional hydraulic valves

Abstract: in the paper a test stand for determination of static and dynamic proportional valves characteristic was presented. A multichannel test stand was developed and presented in the paper. Moreover control system of proportional directional control valve and multichannel slotted line with special software for generation several control signals were presented too. Moreover some experimental tests results were presented for high-

response proportional directional control valve. An example of application obtained results for mathematical model refinement of control of hydrostatic transmission start with minimum noise criterion was presented.

Keywords: proportional directional control valve, proportional control, characteristics, hydrostatic transmission, research

Artykuł recenzowany, nadesłany 18.12.2013, przyjęty do druku 07.02.2014.

dr hab. inż. Zygmunt Kudźma

Pracownik naukowo-dydaktyczny Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej. Absolwent Wydziału Budowy Maszyn i Okrętów Politechniki Szczecińskiej. Doktorat obronił w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Habilitował się na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Obszar działalności naukowej obejmuje m.in.: modelowanie i badania doświadczalne przepływów pulsacyjnych, sposoby redukcji pulsacji ciśnienia i hałasu w układach hydraulicznych, badania właściwości statycznych i dynamicznych zaworów hydraulicznych.

e-mail: zygmunt.kudzma@pwr.wroc.pl



dr inż. Michał Stosiak

Absolwent i pracownik naukowo-dydaktyczny Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej. Doktorat obronił w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Obszar działalności naukowej obejmuje m.in.: redukcję skutków oddziaływania drgań mechanicznych na zawory hydrauliczne, oddziaływanie przepływu pulsacyjnego na elementy sterujące zaworów hydraulicznych, redukcję hałaśliwości pracy układów hydraulicznych.

e-mail: michal.stosiak@pwr.wroc.pl



mgr inż. Szymon Herok

Absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej. W pracy dyplomowej zajmował się identyfikacją właściwości statycznych i dynamicznych zaworów proporcjonalnych oraz układami sterowania tych zaworów.

e-mail: szymon.herok@gmail.com

