

Symulator liniowego napędu hydrostatycznego w laboratorium hydraulicznym

Przemysław Cichoń, Michał Stosiak

Opis symulatora

Maszyny technologiczne znalazły zastosowanie w każdej gałęzi przemysłu. Cechą charakterystyczną współczesnych maszyn jest ich wysoki stopień automatyzacji. Celem automatyzacji jest wyeliminowanie bezpośredniego udziału człowieka z procesu wytwarzania i ograniczenie jego kompetencji do obsługi, nadzoru oraz programowania pracy maszyny [1, 2]. Środkami prowadzącymi do osiągnięcia tego celu są mechanizacja i techniki sterowania prowadzące do mechatronizacji maszyn, urządzeń i procesów.

W codziennej praktyce przemysłowej coraz szersze zastosowanie znajdują układy hydrostatyczne. Ogromny postęp w możliwościach aplikacji tych napędów możliwy jest przez zastosowanie zaworów proporcjonalnych lub wzmacniaczy elektrohydraulicznych (WE).

Podstawową właściwością sterowania proporcjonalnego jest utrzymanie funkcyjnej zależności między elektrycznym sygnałem wejściowym (reprezentowanym przez natężenie prądu lub napięcie sterujące) o małej mocy a hydraulicznym sygnałem wyjściowym (ciśnienie lub natężenie przepływu) o znacznie większej mocy [3].

W dobie intensywnej integracji różnych dziedzin nauki powstają coraz to nowsze obszary dające zupełnie nowe możliwości i osiągi, które dotychczas były niemożliwe. Integracja klasycznej hydrauliki, zminiaturyzowanej elektroniki, zaawansowanej informatyki prowadzi do powstawania nowego kierunku rozwoju układów napędowych [4, 5, 6], a nauka poświęcona tym zagadnieniom nazywana jest hydrotroniką [7].

Przykładem takiego urządzenia jest istniejący w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej symulator liniowego napędu hydrostatycznego (fot. 1, rys. 1). Symulator hydrauliczny jest urządzeniem badawczym układu napędowego o ruchu posuwisto-zwrotnym. Urządzenie to odzwierciedla rzeczywiste warunki pracy urządzeń z tego rodzaju napędem. W skład tego symulatora wchodzi trzy zasadnicze części:

- część hydrauliczna;
- urządzenie sterujące;
- program sterujący.

Część hydrauliczna

Należą do niej następujące elementy:

1. Pompa PV7-16/20 – pompa łopatkowa zmiennej wydajności, charakteryzująca się następującymi danymi:
 - maksymalne ciśnienia pracy $p_{max} = 16$ MPa;
 - maksymalne natężenie przepływu $Q_{max} = 29$ dm³/min;
 - zakres prędkości obrotowej $n_{min} - n_{max} = 900 - 1800$ obr/min.

Streszczenie: W artykule przedstawiono symulator liniowego napędu hydrostatycznego, będącego na wyposażeniu Laboratorium Napędów i Sterowań Hydraulicznych Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Zwrócono uwagę na niektóre jego możliwości aplikacyjne oraz dokonano jego identyfikacji jako źródła hałasu. Jako przykład aplikacji wskazano generator drgań mechanicznych oraz układ regulacji położenia stołu symulatora.

Abstract: In the paper the simulator of linear hydrostatic drive was presented. Considered simulator is a part of Laboratory of Hydraulic Drive and Control of Institute of Machines Design and Operation Wrocław University of Technology. Special attention was focused on some its application possibilities; moreover the simulator was identified as a source of noise. As an example of application the generator of mechanical vibrations and position regulation system were presented.

2. Wzmacniacz elektrohydrauliczny 4WSE2EM10. Do charakterystycznych parametrów opisujących wzmacniacz elektrohydrauliczny należą:
 - nominalne natężenie przepływu cieczy $Q_{nom} = 45$ dm³/min;
 - histereza $\leq 2,5\%$;
 - zakres temperatur pracy od -20 do 80°C ;
 - zakres ciśnień pracy od 1 do 31,5 MPa.
3. Siłownik roboczy CDE 160-32/22-500: średnica tłoka wynosi 32 mm, natomiast tłoczyśka 22 mm. Skok siłownika to 500 mm.
4. Siłownik hamujący CDE 160-32/22 – 400, którego zadaniem jest wytworzenie siły, będącej skutkiem np. oporów technologicznych sił tarcia itp. Siła ta przeciwdziała sile wytwarzanej w siłowniku roboczym.
5. Rozdzielacz 4WMM 6 E53 – sterowany ręcznie 4/3, służący do sterowania pracą siłownika hamującego.
6. Zawór redukcyjny ZDR6DP1 – służący do ograniczenia ciśnienia w komorach siłownika hamującego, a co za tym idzie, określenia wartości siły np. oporu technologicznego.

Urządzenie sterujące SYHCE 1

Urządzenie to może być wykorzystane do sterowania, nadzorowania i regulacji układów napędowych liniowych. W jego skład wchodzi następujące elementy: karta pomiarowa BK1, karta zdalnego sterowania FERN1 oraz nadajnik FBOX, urządzenie sterujące BAS1, karta regulatora VR3D.



Fot. 1. Fotografia symulatora hydraulicznego

Program sterujący HCE 1 produkcji firmy Mannesmann-Rexroth

Za pomocą programu HCE 1 dokonać można wyboru rodzaju regulacji symulatora spośród dwóch głównych rodzajów regulacji: regulacja położenia i regulacja siły. Po dokonaniu wyboru regulacji istnieje możliwość wyboru parametrów regulacji – do dyspozycji są regulatory:

- regulator proporcjonalny P;
- regulator całkujący I;
- regulator różniczkujący D.

W przypadku regulatora P możliwa jest zmiana wartości współczynnika wzmocnienia w zakresie od 0,1 do 500 V/V. W pozostałych regulatorach (I oraz D) zmianie ulegać może czas całkowania T_i i różniczkowania T_d w przedziale od 5 do 500 ms.

Szczegółowy opis części hydraulicznej, urządzenia sterującego i programu sterującego podano w [8, 9].

Symulator ten, którego istotnym elementem jest wzmacniacz elektrohydrauliczny, pracować może jako układ regulacji położenia. Badać można na nim wpływ wyboru struktury układu regulacji oraz nastaw wartości parametrów regulatora na dokładność pozycjonowania stołu symulatora oraz inne wskaźniki charakteryzujące procesy przejściowe (np. czas regulacji, ustalony uchyb regulacji, wartość nadwyżki dynamicznej).

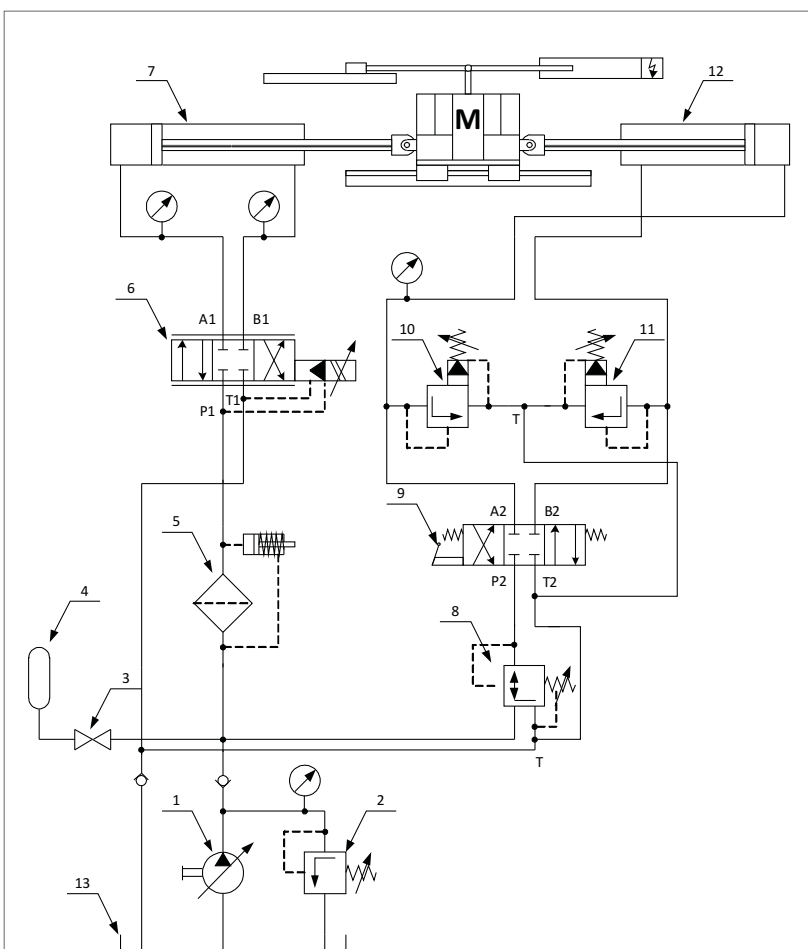
Opisywany symulator hydrauliczny, po pewnych modyfikacjach, może zostać wykorzystany jako źródło zewnętrznych drgań mechanicznych działających na inne elementy układu hydraulicznego (zawory, zasilacze, przewody hydrauliczne i inne). W tym przypadku bada się wpływ zewnętrznych drgań mechanicznych na zmiany w widmie amplitudowo-częstotliwościowym pulsacji ciśnienia w układzie hydraulicznym, którego element (elementy) poddawane są drganiom

[10, 12, 13]. Charakterystyczna struktura układu hydraulicznego zastosowanego w opisywanym symulatorze pozwala na realizację wielu aplikacji z jej wykorzystaniem: przesiewacze, ubijaki, układy pulsacyjne, samoloty, przenośniki wstrząsowe, generatory drgań itp.

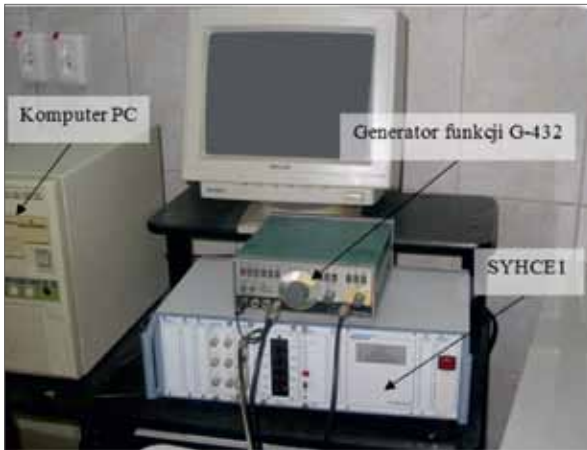
Symulator jako generator drgań mechanicznych

Problem oddziaływania drgań mechanicznych na zawory hydrauliczne jest aktualny i ważny, o czym świadczy fakt, iż podejmowany i opisywany był w ostatnim czasie m.in. w [10, 11, 12]. Wśród skutków drgań mechanicznych działających na zawory hydrauliczne wymienić można m.in.: powstawanie pulsacji ciśnienia, będącej skutkiem wzbudzenia się drgań elementów sterujących zaworów [13], pogorszenie dokładności pozycjonowania odbiorników hydraulicznych czy wzrost hałasu. W laboratorium Zakładu Napędów i Automatyki Hydraulicznej Politechniki Wrocławskiej do celów generowania drgań mechanicznych wykorzystywany jest opisywany symulator, co pozwala, po jego modernizacji, zamocować na nim wybrane zawory hydrauliczne i poddawać je zewnętrznym drganiom mechanicznym o zadanej częstotliwości. Praca symulatora odpowiada części spektrum drgań mechanicznych występujących w rzeczywistych warunkach pracy układu hydraulicznego, np. na ramie maszyny mobilnej czy obrabiarce [14, 15].

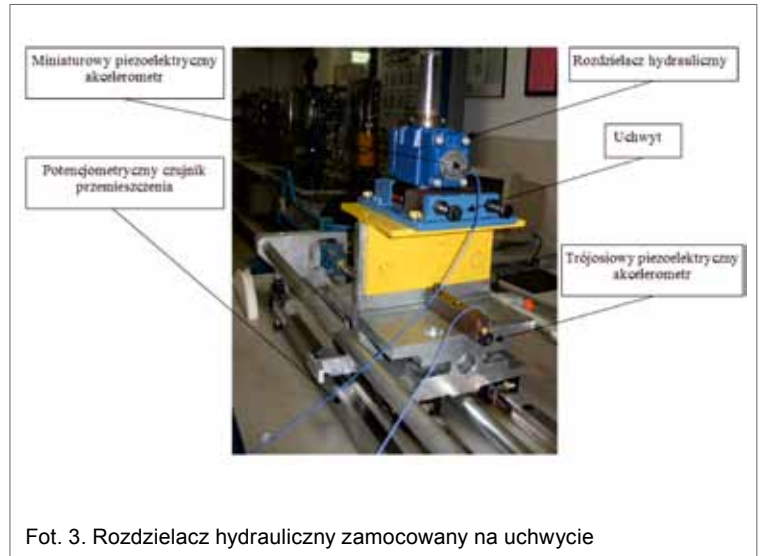
W przypadku drgań wymuszonych o przebiegu harmonicznym dopuszczalne wartości skuteczne przemieszczeń można określić na podstawie wzoru [16, 17]:



Rys. 1. Schemat układu hydraulicznego symulatora liniowego napędu hydrostatycznego: 1 – pompa zmiennej wydajności; 2 – zawór maksymalny; 3 – zawór odcinający; 4 – akumulator; 5 – filtr oleju; 6 – wzmacniacz elektrohydrauliczny; 7 – siłownik zadający; 8 – zawór redukcyjny; 9 – rozdzielacz 4/3; 10, 11 – zawór przelewowy; 12 – siłownik obciążający; 13 – zbiornik oleju hydraulicznego



Fot. 2. Urządzenie sterujące SYHCE1 wraz z podłączonym komputerem PC oraz generatorem funkcji harmonicznej



Fot. 3. Rozdzielacz hydrauliczny zamocowany na uchwycie

$$x_u = \frac{v_u}{2 \cdot \pi \cdot f_u} \text{ [m]} \quad (1)$$

gdzie: v_u jest wartością skuteczną prędkości drgań [m/s], f_u – częstotliwością [Hz].

Natomiast dopuszczalną wartość skuteczną przyspieszeń drgań można obliczyć z wzoru:

$$a_u = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot v_u \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (2)$$

Natężenie drgań mechanicznych można również określić z zależności [16]:

$$\chi = \frac{a^2}{f} \quad (3)$$

Do opisu sygnału o nieskończonym (bardzo długim) czasie trwania, w tym sygnałów okresowych, można stosować pojęcie mocy średniej sygnału okresowego [17] zdefiniowanej jako:

$$P_x = \langle x^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt \quad (4)$$

gdzie T jest okresem sygnału x , a t_0 dowolnym punktem osi czasu.

Operując terminologią stosowaną w teorii sygnałów, wielkość P_x można nazwać kwadratem wartości skutecznej sygnału, a $\sqrt{P_x}$ jego wartością skuteczną.

Można zatem, używając równania (2), dokonać porównania wartości skutecznych przyspieszenia drgań na rzeczywistych maszynach z wartościami skutecznymi przyspieszenia drgań uzyskiwanymi na symulatorze hydraulicznym HYDROPAX ZY25.

Dla symulatora HYDROPAX ZY25 wartość skuteczną przyspieszenia drgań, dla parametrów pracy $f=40$ Hz i $v_u=0,085$ m/s, zgodnie z (2) wynosi:

$$a_u = 2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot 0,085 = 21,4 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

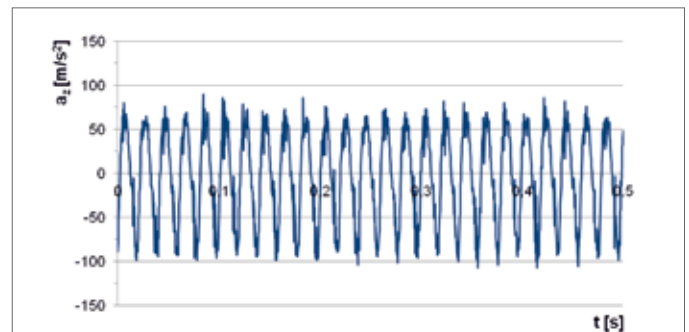
natomiast wartość skuteczną przyspieszenia drgań zmierzonych na zasilaczu hydraulicznym własnej konstrukcji, w którym

pompa wielotłokowa PNZ-25 napędzana jest silnikiem elektrycznym z prędkością 1500 obr/min, wynosi:

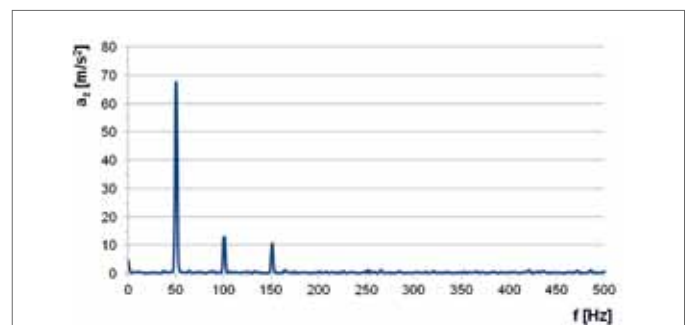
$$a_u = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n \cdot z}{60} \cdot v_u = 2 \cdot \pi \cdot 175 \cdot 0,0176 = 19,3 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

gdzie $z = 7$.

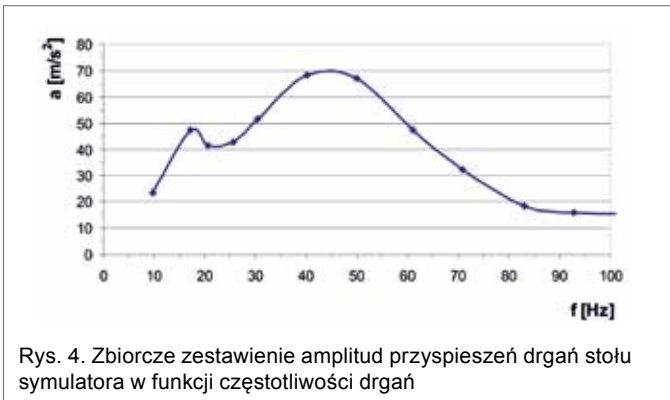
Powyższe rozważania wskazują, że opisywany symulator może być stosowany jako generator drgań mechanicznych, gdyż wartości skuteczne przyspieszenia drgań na nim osiągnięte zbliżone są do wartości występujących na rzeczywistych urządzeniach wyposażonych w układy hydrauliczne.



Rys. 2. Przyspieszenie drgań stołu symulatora w funkcji czasu dla częstotliwości drgań 50 Hz



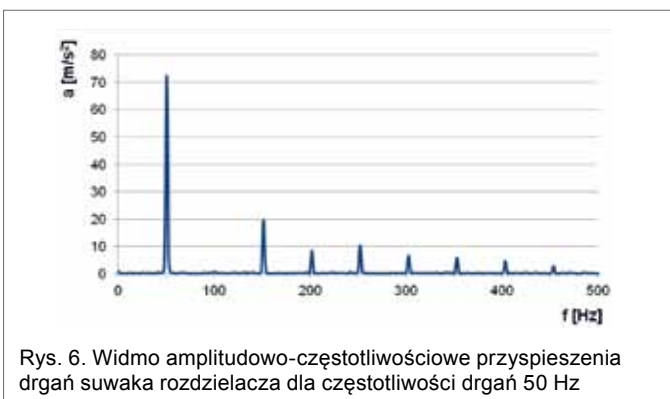
Rys. 3. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszenia drgań stołu symulatora dla częstotliwości drgań 50 Hz



Rys. 4. Zbiorcze zestawienie amplitud przyspieszeń drgań stołu symulatora w funkcji częstotliwości drgań



Rys. 5. Przyspieszenie drgań suwaka rozdzielacza w funkcji czasu dla częstotliwości drgań 50 Hz

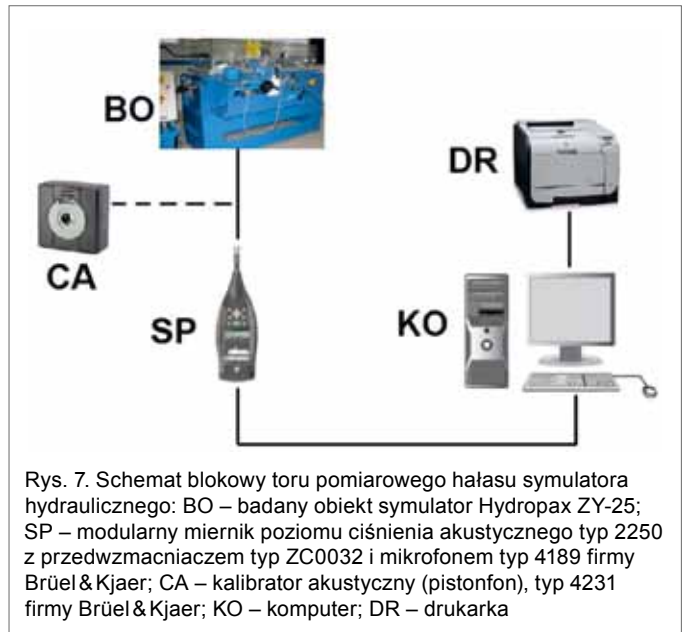


Rys. 6. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszenia drgań suwaka rozdzielacza dla częstotliwości drgań 50 Hz

Na fot. 2 przedstawiono część układu sterowania drganiami, tu zadawana była postać i częstotliwość drgań. Zgodnie z zaleceniami producenta nie przekraczano częstotliwości 100 Hz [8, 9].

Przeprowadzono badania rozpoznawcze w tym zakresie, a wybrane wyniki prezentuje się na rys. od 2 do 4. Na stole symulatora, w specjalnie zaprojektowanym i wykonanym uchwycie, zamocowano rozdzielacz hydrauliczny, który poddawano drganiom mechanicznym (fot. 3). Przyspieszenie drgań mechanicznych mierzono trójosiowym piezoelektrycznym akcelerometrem, który przymocowano do stołu symulatora. Przemieszczenie stołu symulatora mierzono natomiast potencjometrycznym czujnikiem przemieszczenia. Przyspieszenie drgań suwaka rozdzielacza mierzono miniaturowym piezoelektrycznym akcelerometrem.

Przykładowe wyniki, w postaci przebiegu czasowego przyspieszenia drgań stołu symulatora, pracującego jako generator drgań mechanicznych, pokazano na rys. 2.



Rys. 7. Schemat blokowy toru pomiarowego hałasu symulatora hydraulicznego: BO – badany obiekt symulator Hydropax ZY-25; SP – moduł miernik poziomu ciśnienia akustycznego typ 2250 z przedwzmacniaczem typ ZC0032 i mikrofonem typ 4189 firmy Brüel & Kjaer; CA – kalibrator akustyczny (pistonfon), typ 4231 firmy Brüel & Kjaer; KO – komputer; DR – drukarka

Zarejestrowany przebieg czasowy przyspieszenia drgań stołu symulatora (rys. 2), wykorzystując program Origin 7.5 PRO, przedstawiono w postaci widma amplitudowo-częstotliwościowego (rys. 3).

Wartości amplitud przyspieszeń drgań dla poszczególnych częstotliwości drgań pokazane zostały na zbiorczym wykresie (rys. 4).

Analiza zarejestrowanych wyników wskazuje, że symulator poprawnie pracuje jako źródło drgań mechanicznych. Wskazuje na to również analiza FFT pokazana na rys. 3 oraz rys. 6. W widmie przyspieszenia drgań stołu symulatora składową dominującą jest składowa dla częstotliwości 50 Hz, która została zadana na pokrętle nastawnika częstotliwości generatora funkcji G-432 (fot. 2).

Identyfikacja symulatora jako źródła hałasu

Pracujący jako źródło drgań mechanicznych symulator jest źródłem hałasu o znacznym poziomie. Wykorzystując sonometr pracujący w torze pomiarowym przedstawionym na rys. 7, dokonano pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego L_m [dB]. Pomiar akustyczny poziomu ciśnienia akustycznego (L_m) przeprowadzono, wykorzystując moduł miernik poziomu ciśnienia akustycznego z zapisem historii czasowej i analizą częstotliwości (sonometr, klasa dokładności I) firmy B&K typ 2250 nr serii 2506429 z przedwzmacniaczem typ ZC 0032 nr fabryczny 4112 i mikrofonem typ 4189 nr serii 2519832. Pomiar, a następnie rejestrację sygnału akustycznego w postaci poziomu ciśnienia akustycznego prowadzono przy włączonej charakterystyce czasowej miernika *fast* (szybko). Przed rozpoczęciem pomiarów i po ich zakończeniu tor pomiarowy hałasu poddano kalibracji. Użyto do tego celu wzorcowego źródła ciśnienia akustycznego (kalibrator akustyczny firmy B&K typ 4231) o ściśle określonym poziomie $L_m = 93,85$ dB. Prezentuje się wyniki dla częstotliwości pracy symulatora jako generatora drgań mechanicznych z częstotliwością 40 Hz – rys. 8. Widmo terejowe ograniczono do częstotliwości 100 Hz.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, wykorzystując zależność:

Tabela 1. Współczynniki jakości dynamicznej przebiegów doświadczalnych

Nr przebiegu na rys. 10	Czas narastania [s]	Czas regulacji [s]	Przeregulowanie [%]	Współczynnik nadwyżki dynamicznej położenia [-]	Uchyb ustalony [mm]
1	0,72	3,25	22	0,17	4
2	0,28	1,40	54	0,46	4
3	0,27	4	14	0,08	5
4	0,28	1,62	35	0,31	3

$$L_{mg} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{mi}} \quad (5)$$

wyznaczono globalny poziom ciśnienia akustycznego dla symulatora pracującego z określoną częstotliwością: 10, 30, 40, 60, 90 Hz – rys. 9.

Z wykresu przedstawionego na rys. 8 wynika, że w zakresie do 100 Hz dominująca składowa widma poziomu ciśnienia akustycznego odpowiada częstotliwości generowanych drgań mechanicznych i osiąga znaczne wartości, bliskie 85 dB. Wyniki przedstawione na rys. 9 wskazują natomiast, że najgłośniejsza praca symulatora ma miejsce wówczas, gdy pracuje on jako generator drgań o częstotliwości 40 Hz.

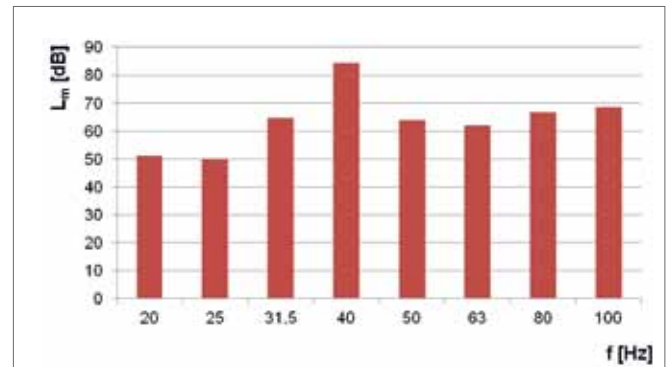
Symulator jako układ regulacji położenia

Przeprowadzono badania doświadczalne, w których opisywany symulator pracował jako układ regulacji położenia. Zbadano wpływ wartości nastaw parametrów regulatora PID na niektóre wskaźniki dynamiczne odniesione do położenia stołu symulatora. Wybrane przebiegi wymuszenia i przemieszczenia przedstawiono na rys. 10. Dokonano serii pomiarów, każdy pomiar odbył się z innym parametrem wzmocnienia, przy tej samej wartości wymuszenia.

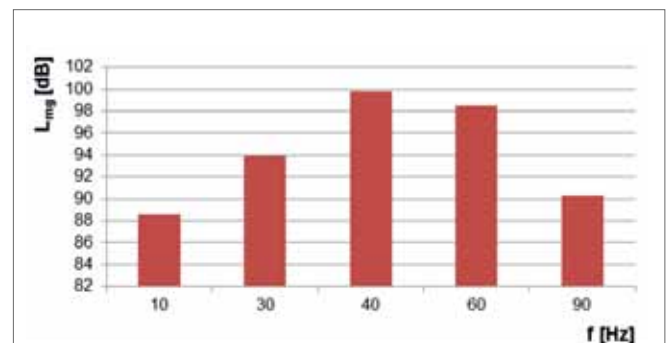
Przedstawione wyniki badań doświadczalnych wskazują, że na kształtowanie procesu przejściowego (rozruchu) oraz dokładność pozycjonowania stołu symulatora istotny wpływ mają wartości nastaw parametrów regulatora. Współczynniki, będące miarami obciążeń dynamicznych – przeregulowanie i nadwyżka dynamiczna – osiągają wartości minimalne dla przebiegu 3 na rys. 10. Jednakże obserwuje się tu występowanie znanego z automatyki kompromisu, który dla tego przypadku można w skrócie sformułować następująco: nadwyżka dynamiczna – czas trwania procesu przejściowego. Na przebiegu 3 na wykresie 10 zaobserwować można najmniejszą wartość nadwyżki dynamicznej położenia, lecz towarzyszy temu najdłuższy czas trwania procesu przejściowego (łącznie czas narastania i czas regulacji). Natomiast dla zaobserwowanego najkrótszego czasu trwania procesu przejściowego, dla przebiegu 2 na rys. 10, obserwuje się największe wartości przeregulowania i współczynnika nadwyżki dynamicznej.

Podsumowanie

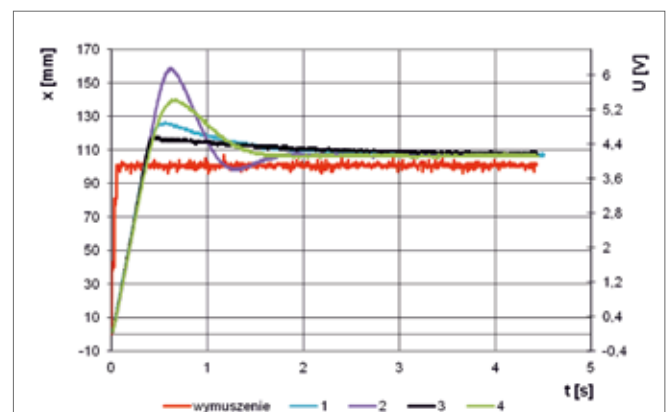
Przedstawione w artykule możliwości aplikacyjne symulatora liniowego napędu hydrostatycznego stanowią jedynie pewien fragment wszystkich możliwych jego zastosowań. Wymienić można kilka z nich: badanie wpływu struktury układu regulacji na dokładność pozycjonowania stołu symulatora oraz przebieg procesów przejściowych, badania wpływu charakteru obciążenia (przeciwsłownikiem) na przebiegi ciśnień w symulatorze, badanie wpływu akumulatora hydraulicznego na dokładność pozycjo-



Rys. 8. Widmo tercjowe poziomu ciśnienia akustycznego symulatora pracującego jako generator drgań mechanicznych z częstotliwością 40 Hz. Widmo ograniczone do 100 Hz



Rys. 9. Globalny poziom ciśnienia akustycznego symulatora pracującego z częstotliwością 10, 30, 40, 60, 90 Hz



Rys. 10. Przebieg wymuszenia i odpowiedzi układu w funkcji czasu (regulator sparametryzowany z pominięciem doboru nastaw): 1 – K = 9 V/V, Ti = 150 ms, Td = 7 ms; 2 – K = 4,5 V/V, Ti = 75 ms, Td = 5 ms; 3 – K = 18 V/V, Ti = 150 ms, Td = 7 ms; 4 – K = 4,5 V/V, Ti = 150 ms, Td = 7 ms+

nowania i przebiegi ciśnienia w układzie symulatora, badania wpływu zewnętrznych drgań mechanicznych, których źródłem jest pracujący symulator, na elementy i układy hydrauliczne. Jak pokazano na podstawie przeprowadzonych akustycznych badań identyfikacyjnych, pracujący symulator jest również źródłem hałasu, w którego spektrum znajdują się również niskie częstotliwości – szczególnie niebezpieczne dla organizmu ludzkiego.

rekłama

Literatura

- [1] CICHON P., STOSIAK M.: *Hydrauliczny wzbudnik drgań mechanicznych w technice proporcjonalnej*. „Napędy i Sterowanie”, nr 3, marzec 2011.
- [2] PIZOŃ A.: *Hydrauliczne i elektrohydrauliczne układy sterowania i regulacji*. WNT, Warszawa 1995.
- [3] TOMASIAK E.: *Interdyscyplinarność techniki sterowania proporcjonalnego*. „Hydraulika i pneumatyka”, zeszyt 4/2001.
- [4] KUDŹMA Z., STOSIAK M.: *Zjawiska falowe w układach hydrostatycznych sterowanych proporcjonalnie*. „Hydraulika i Pneumatyka”, nr 6/2002.
- [5] BURKEL R., ROMES R.: *Integration von Elektronik in Bauelemente der hydraulischen Antriebstechnik*. „Olhydraulik und Pneumatik”, 4/1988.
- [6] BARTYŚ M., ŁUKOMSKI W.: *Sterowanie rozdzielaczy elektrohydraulicznych o działaniu proporcjonalnym*. „Hydraulika i Pneumatyka”, nr 5/97.
- [7] DINDORF R., WOŁKOW J.: *Hydrotronika tendencją w rozwoju hydrauliki*. Konferencja Naukowo-Techniczna „Napędy i Sterowania Hydrauliczne’2002”. Wrocław 2002.
- [8] Instrukcja obsługi symulatora Hydropax ZY 25, Mannesmann-Rexroth.
- [9] Dokumentation SYHCE-1-1X. Mannesmann-Rexroth, 1995.
- [10] STOSIAK M.: *Oddziaływanie niskoczęstotliwościowych drgań mechanicznych podłoża na element sterujący zaworu hydraulicznego*. W: *Rozwój maszyn i urządzeń hydraulicznych*. KOLLEK W. (red.), Wrocław: Wydaw. Wroc. Rady FSNT NOT, 2006.
- [11] AMINI A., OWEN I.: *A practical solution to the problem of noise and vibration in a pressure-reducing valve*. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 10, 1995.
- [12] STOSIAK M.: *Vibration insulation of hydraulic system control components*. „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, vol. 11, nr 1, 2011.
- [13] STOSIAK M.: *Drgania elementów nastawiających zaworów hydraulicznych*. „Przegląd Mechaniczny”, nr 6, 2010.
- [14] GRAJNERT J.: *Izolacja drgań w maszynach i pojazdach*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
- [15] MARCHELEK K.: *Dynamika obrabiarek*. WNT, Warszawa 1991.
- [16] ENGEL Z.: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [17] SZABATIN J.: *Podstawy teorii sygnałów*. WKŁ, Warszawa 2003.

dr inż. Michał Stosiak – kierownik Zakładu Napędów i Automatyki Hydraulicznej, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska, e-mail: michal.stosiak@pwr.wroc.pl;
inż. Przemysław Cichoń – magistrant w Zakładzie Napędów i Automatyki Hydraulicznej, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska,
e-mail: przemyslaw.cichonn@gmail.com