

Siłownik pneumatyczny wspomagany układem hydraulicznym

Pneumatic actuator supported with hydraulic system

JAKUB SIKORSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.5-6.42>

Przedstawiono eksperyment konstrukcyjny polegający na dołączeniu do siłownika pneumatycznego dodatkowego układu hydraulicznego, aby wywołać zjawiska dynamiczne w cylindrze siłownika. Dzięki temu możliwe jest ograniczenie występowania zjawiska *stick-slip*, które często się pojawia w siłownikach liniowych przy małej prędkości względnej tłoka i cylindra. Celem tego projektu jest uzyskanie możliwości precyzyjnego sterowania położeniem tłoka siłownika pneumatycznego bez konieczności stosowania skomplikowanych układów wykorzystujących algorytmy z funkcjami nieliniowymi.

SŁOWA KLUCZOWE: siłownik, *stick-slip*, pneumatyka, hydraulika

A design experiment involving the addition of the hydraulic line to the pneumatic cylinder to trigger dynamic phenomena in the cylinder is presented. Thanks to this, it is possible to limit the occurrence of the stick-slip phenomenon, often occurring in linear actuators at low mutual speed of the piston and the cylinder. The purpose of this operation is to obtain the possibility of precise control of the piston position of the pneumatic cylinder without using complicated systems using algorithms with nonlinear functions.

KEYWORDS: actuator, *stick-slip*, pneumatic, hydraulic

Wprowadzenie

W maszynach stosuje się często napędy pneumatyczne lub hydrauliczne, ale zazwyczaj nie umieszcza się aktywnych układów pneumatycznych i hydraulicznych w jednym urządzeniu. Jest to związane z unikaniem niepotrzebnego komplikowania konstrukcji. W typowych rozwiązaniach pneumohydraulicznych część pneumatyczna (aktywna) stanowi napęd, natomiast część hydrauliczna (pasywna) służy do regulowania prędkości układu napędowego. Zdarzają się jednak konstrukcje, w których łączy się oba aktywne układy, aby uzyskać pożądane działanie mechanizmu.

W konstrukcjach siłowników pneumatycznych stosuje się coraz więcej elementów uszczelniających oraz prowadzących tłok i tłoczysko. Jednocześnie rosną wymagania wobec chropowatości powierzchni cylindrów i tłoczysk współpracujących z uszczelnieniami i prowadnikami [2, 5, 9]. Ma to na celu wydłużenie bezawaryjnej pracy urządzeń zawierających te elementy, nie powoduje jednak wyeliminowania niekorzystnego tarcia pojawiającego się podczas pracy siłownika, np. zjawiska *stick-slip*.

Zjawisko *stick-slip* utrudnia precyzyjne kontrolowanie prędkości i pozycjonowania siłownika pneumatycznego przy niskich prędkościach względnych między tłokiem a cylindrem. Aby temu przeciwdziałać, trzeba określić nieliniową charakterystykę tarcia występującego w siłowniku i wyrazić ją za pomocą modelu matematycznego. Ponadto, jeśli model matematyczny charakterystyki tarcia jest w pełni określony, już na etapie projektowania urządzenia można dokładnie przewidzieć w symulacji dynamiczne zachowania siłownika [10].

Występowanie tarcia w siłowniku pneumatycznym zależy od wielu czynników. Zaliczają się do nich: konstrukcja siłownika, kierunek ruchu tłoka siłownika i lepkość smaru. Kontrolę nad pracą siłownika utrudnia dodatkowo ściśnięcie czynnika roboczego, jakim jest powietrze. Uwzględnienie wpływu tych wszystkich czynników na działanie siłownika pneumatycznego jest konieczne, aby opracować układ sterowania, w którym zostaną skompensowane negatywne zjawiska wynikające z charakterystyki tarcia i który pozwoli zastosować siłownik pneumatyczny jako element precyzyjnego serwomechanizmu [1, 10].

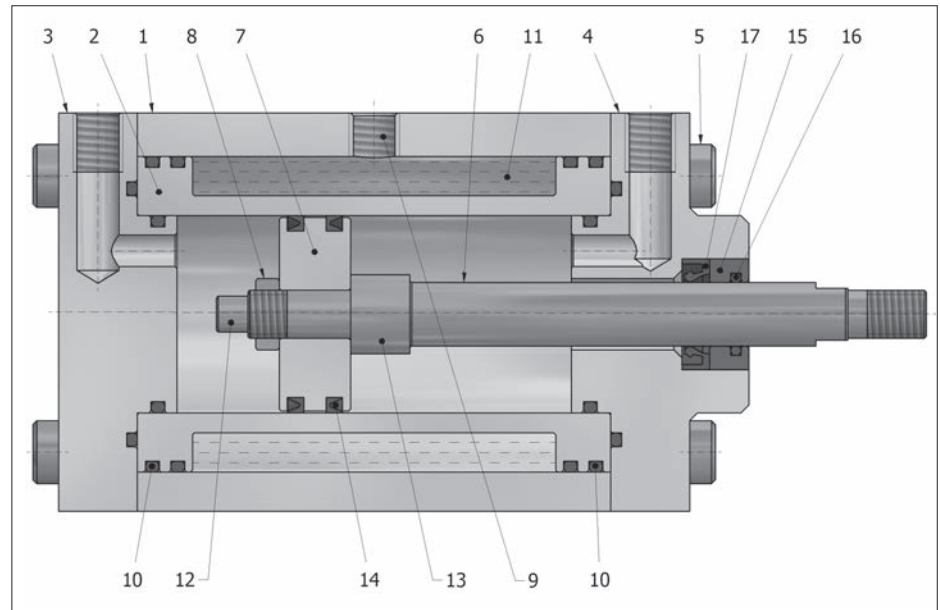
Zaprojektowanie układu sterowania kompensującego zjawisko *stick-slip* jest skomplikowane. Jak wykazano, w tym przypadku nie mają zastosowania algorytmy sterowania liniowego, gdyż samo zjawisko *stick-slip* ma nieliniowy charakter. Konieczne jest użycie algorytmów zawierających funkcje nieliniowe [3, 10]. Wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie zjawiska *stick-slip* w siłowniku pneumatycznym pozwoliłoby na uproszczenie układu sterowania.

Obecnie stosowane siłowniki pneumatyczne działają prawidłowo podczas ruchu uszczelnień po powierzchniach ślizgowych. Jednak każde zatrzymanie siłownika wywołuje niekorzystne zjawisko przywierania uszczelnień do powierzchni ślizgowych, nasilające się wraz z wydłużaniem się czasu zatrzymania siłownika. Wynika to z wyciskania środka smarnego pomiędzy powierzchni uszczelnienia oraz elementów ślizgowych, co jest spowodowane elastycznością elementu uszczelniającego [6].

W artykule przedstawiono nową konstrukcję siłownika pneumatycznego, w której zredukowano niekorzystne zjawisko przywierania uszczelnień do powierzchni ślizgowych. Do siłownika pneumatycznego doprowadzono dodatkowy układ hydrauliczny. Dzięki specjalnie opracowanemu siłownikowi ma on ograniczać przywieranie uszczelnień tłoka i tym samym eliminować zjawisko *stick-slip*.

* Mgr inż. Jakub Sikorski (jakub.sikorski@p.lodz.pl), <https://orcid.org/0000-0001-5979-0498> – Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, Politechnika Łódzka, Łódź, Polska

Rys. 1. Przekrój wzdłużny siłownika z zakreskowanym obszarem, w którym znajduje się płyn hydrauliczny



Opis konstrukcji

Mechanizm zaprojektowano w programie Autodesk Inventor Professional. Jest to parametryczny program pozwalający na trójwymiarowe projektowanie części. Można je składać w podzespoły i całe maszyny. Program ma szereg funkcjonalności ułatwiających projektowanie urządzeń, m.in. do analizy kolizji podzespołów, kinematyki i dynamiki (aby kontrolować współpracę podzespołów) oraz do analizy wytrzymałości metodą elementów skończonych. Możliwy jest pomiar odkształceń elementów pod wpływem sił zewnętrznych, co pozwala określić wpływ ciśnienia płynu hydraulicznego na części siłownika [4, 7].

Na rys. 1 pokazano przekrój wzdłużny podzespołu w płaszczyźnie przechodzącej przez oś cylindra siłownika pneumatycznego. Mechanizm składa się z cylindra (1) oraz wsuniętego w niego cylindra wewnętrznego (2), w którym osadzono pokrywę tylną (3) oraz pokrywę przednią (4), połączone rozłącznie z cylindrem (1) za pomocą śrub (5). Pokrywa przednia (4) ma osiowo

położone: otwór oraz gniazdo z osadzonym w nich przesuwnie tłoczyskiem (6). Koniec tłoczyska (6) umieszczono w cylindrze wewnętrznym (2) i połączono z tłokiem (7) za pomocą nakręconej na koniec tłoczyska nakrętki (8) [6].

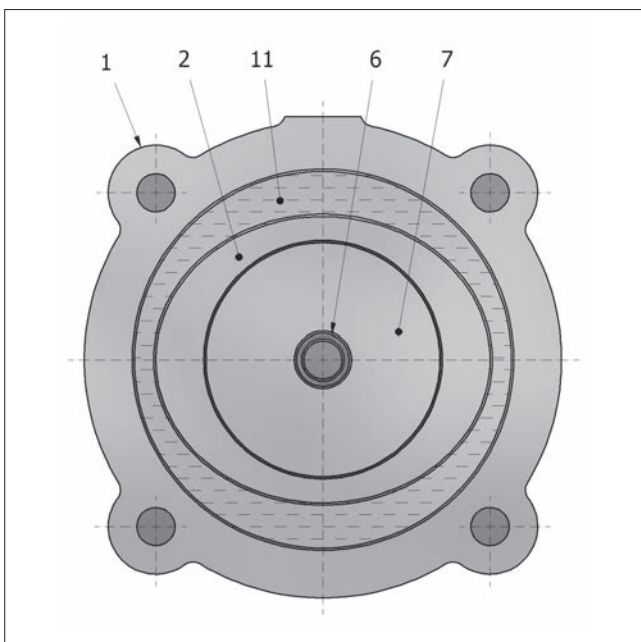
Tłoczysko (6) ma elementy dystansowe (12) i (13) o długości równej co najmniej dwukrotnej grubości kołnierza cylindra wewnętrznego (2). Ich obecność jest niezwykle istotna konstrukcyjnie, ponieważ nie pozwalają one na przesunięcie się tłoka (7) z uszczelnieniami elastycznymi (14) na pozycję, w której drgania cylindra wewnętrznego (2) nie występują lub występują minimalnie [6].

Pokrywa przednia (4) ma w gnieździe: element prowadzący (15), pierścień zgarniający (16) i pierścień uszczelniający (17), w których poprowadzono tłoczysko (6) [6].

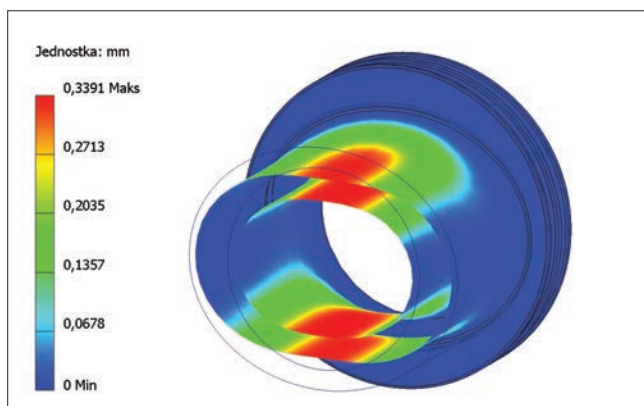
Na rys. 2 pokazano, że cylinder wewnętrzny (2) w przekroju poprzecznym ma kształt pierścienia, przy czym obrys zewnętrzny tego pierścienia jest eliptyczny, a obrys wewnętrzny – okrągły. Cylinder wewnętrzny (2) jest z obu stron zakończony kołnierzami o średnicy równej średnicy wewnętrznej cylindra (1), zaopatrzonymi w elementy uszczelniające (10). Przestrzeń pomiędzy cylindrem (1) a cylindrem wewnętrznym (2) jest wypełniona cieczą hydrauliczną (11) [6].

Zasada działania

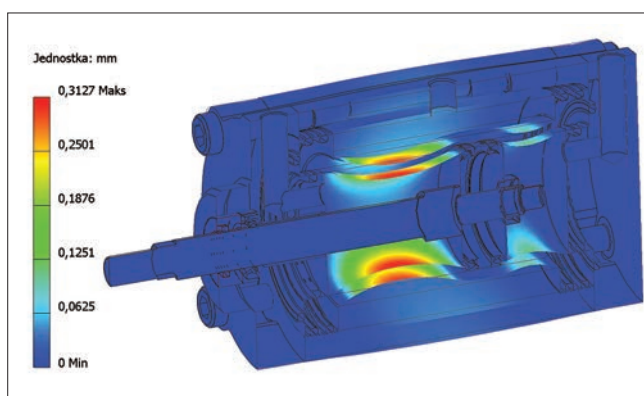
Ponieważ cylinder wewnętrzny (2) ma od strony zewnętrznej zarys eliptyczny, grubość jego ścianki jest nierównomierna na całym obwodzie. Dzięki temu pod wpływem wzrostu ciśnienia cieczy hydraulicznej (11), znajdującej się w przestrzeni pomiędzy cylindrem (1) a cylindrem wewnętrznym (2), cylinder nierównomiernie się odkształca. Drowadzenie zmiennego ciśnienia hydraulicznego do cylindra (1) poprzez otwór (9) zapewnia właściwe ciśnienie cieczy hydraulicznej (11) oraz jego pulsację niezbędną do uzyskania efektu drgania cylindra wewnętrznego (2) poprzez jego cykliczne odkształcanie się. Pulsacje ciśnienia cieczy hydraulicznej (11) znajdującej się w przestrzeni pomiędzy cylindrami (1) i (2) wywołują odpowiadające im odkształcenia cylindra wewnętrznego (2). To z kolei zapewnia ruch pomiędzy powierzchnią ślizgową cylindra wewnętrznego (2) a uszczelnieniem (14) tłoka (7). Ruch ten redukuje zjawisko przywierania uszczelnień do powierzchni ślizgowych [6].



Rys. 2. Przekrój poprzeczny siłownika z zakreskowanym obszarem, w którym znajduje się płyn hydrauliczny



Rys. 3. Cylinder wewnętrzny odkształcony pod wpływem oddziaływania płynu hydraulicznego o ciśnieniu 10 MPa



Rys. 4. Siłownik pneumatyczny odkształcony pod wpływem oddziaływania płynu hydraulicznego o ciśnieniu 10 MPa

Opisany efekt jest ważny zwłaszcza na początku ruchu siłownika, gdy zjawisko przywierania uszczelnień jest największe; tym silniejsze im dłuższy był czas zatrzymania siłownika. Możliwe jest uruchomienie pulsacji ciśnienia cieczy hydraulicznej przed rozpoczęciem właściwego ruchu roboczego siłownika pneumatycznego, co zapewnia jego płynny start ze zminimalizowaniem skokowych przemieszczeń tłoka w początkowym okresie pracy siłownika. Pulsacja ciśnienia jest również przydatna podczas zatrzymywania siłownika, gdyż zapewnia większą precyzję końcowego położenia tłoka siłownika [6].

Na rys. 3 pokazano wpływ ciśnienia cieczy hydraulicznej na cylinder wewnętrzny (2). Zmiana ciśnienia cieczy hydraulicznej w przestrzeni pomiędzy cylindrem (1) a cylindrem wewnętrznym (2) zawiera się w zakresie od 0 do 10 MPa. Na podstawie prac [8, 10] określono optymalną częstotliwość pulsacji ciśnienia na $1 \div 2$ Hz. Wyraźnie widać różnicę w odkształceniu ścianki cylindra, dzięki czemu zmienia się wzajemne położenie powierzchni ślizgowych i uszczelnień elastycznych (14), co eliminuje ich przywieranie i ogranicza zjawisko *stick-slip*.

Na rys. 4 pokazano wpływ ciśnienia cieczy hydraulicznej na cały zespół siłownika pneumatycznego. Zgodnie z założeniami konstrukcyjnymi ciśnienie odkształca głównie cylinder wewnętrzny, bez znacznego wpływu na pozostałe elementy siłownika. Jest to ważne dla zapewnienia prawidłowej pracy mechanizmu.

Podsumowanie

Wprowadzenie ruchu względnego pomiędzy uszczelnieniem tłoka a cylinder minimalizuje zjawisko przywierania uszczelnień do powierzchni styku z cylindrem. To nowe

podejście do eliminacji lub znacznego ograniczenia występowania zjawiska *stick-slip* obejmuje zastosowanie aktywnego układu hydraulicznego w konstrukcji siłownika pneumatycznego. Takie rozwiązanie może powodować znaczne skomplikowanie konstrukcji układu zasilania siłownika pneumatycznego. Wymagany jest bowiem zasilacz hydrauliczny, umożliwiający wygenerowanie pulsacji ciśnienia zasilania. Poza tym niezbędne są zmiany w konstrukcji siłownika pneumatycznego poprzez wyposażenie go w elementy układu hydraulicznego generującego odkształcenia cylindra pneumatycznego.

Tak złożony konstrukcyjnie i technologicznie napęd może się okazać droższy w wykonaniu w porównaniu z klasycznym siłownikiem pneumatycznym. Jednakże zastosowanie siłownika o proponowanej budowie będzie uzasadnione w układach, w których konieczne jest zatrzymanie tłoka w położeniach pośrednich pomiędzy w pełni wysuniętym oraz wsuniętym tłoczyskiem. Uzyskanie takich położeniach siłownika pneumatycznego zawsze się wiązało z koniecznością zastosowania dodatkowych mechanizmów podnoszących stopień skomplikowania konstrukcji. Poprzez wyeliminowanie zjawiska *stick-slip* zaproponowana konstrukcja pozwala na zwiększenie precyzji pozycjonowania tłoka w porównaniu z klasycznym siłownikiem pneumatycznym.

Zmiany konstrukcyjne przedstawione w opisanym rozwiązaniu siłownika pneumatycznego wprowadzają konieczność zastosowania w układzie dodatkowego zasilacza hydraulicznego, zdolnego do generowania zmiennego ciśnienia płynu hydraulicznego. Możliwe jest jednak wykorzystanie jednego zasilacza do większej liczby siłowników pracujących w jednym urządzeniu. Pozwala to na znaczne zmniejszenie kosztów zastosowania nowej technologii w odniesieniu do pojedynczego siłownika.

Zaproponowany mechanizm ma dodatkowe zalety wynikające ze stosowania siłowników pneumatycznych. Są to tani główny czynnik roboczy, jakim jest powietrze, oraz możliwość uzyskiwania płynnego ruchu siłownika, a nawet jego zatrzymania pod wpływem czynników zewnętrznych bez uszkodzenia siłownika oraz współpracujących z nim mechanizmów.

LITERATURA

- [1] Andrighetto P.L., Valdiero A.C., Carlotto L. "Study of the friction behavior in industrial pneumatic actuators". *ABCM Symposium Series in Mechatronics*. 2 (2006): 369–376.
- [2] Hennlich. „Uszczelnienia techniczne”, <https://www.hennlich.pl-produkty/uszczelnienia-techniczne-1151.html> (dostęp: 2014).
- [3] Kyoizumi K., Yukishige Fujita Y., Mizumoto I., Iwai Z. "Simple adaptive control for positioning of pneumatic cylinder with adverse stick-slip". *IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing*. 37, 12 (2004): 87–92. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)31448-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31448-9).
- [4] Munford P., Normand P. "Mastering Autodesk Inventor 2016 and Autodesk Inventor LT 2016: Autodesk Official Press". Wiley John & Sons, 2016.
- [5] Pneumat System. „Siłowniki pneumatyczne”, http://www.pneumat.com.pl/silowniki_pneumatyczne?gclid=EAlaIqOBChMlweP11-LI4QlVioeyCh2RXw6yEAAYASAAEgIDIPD_BwE (dostęp: 2017).
- [6] Sikorski J. Zgłoszenie patentowe: Siłownik pneumatyczny, nr P. 424565 (2018).
- [7] Stasiak F. „Zbiór ćwiczeń Autodesk Inventor 2017. Kurs zaawansowany”. ExpertBooks, 2016.
- [8] Tran X.B., Yanada H. "Dynamic friction behaviors of pneumatic cylinders". *Intelligent Control and Automation*. 4, 2 (2013): 180–190, <https://doi.org/10.4236/ica.2013.42022>.
- [9] Trelleborg „Uszczelnienia dla urządzeń pneumatycznych”, <https://www.tss.trelleborg.com/pl-pl/products-and-solutions/pneumatic-seals> (dostęp: 2007).
- [10] Wakasawa Y., Ito Y., Yanada H. "Friction and vibration characteristics of pneumatic cylinder". *The 3rd International Conference on Design Engineering and Science, ICDES 2014*. (2014): 155–159. ■