

WPLYW KLASY CZYSTOŚCI CIECZY NA ZJAWISKO EROZJI KRAWĘDZI STERUJĄCYCH SUWAKA SERWOZAWORU

Bartosz Minorowicz, Frederik Stefański

Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania

Streszczenie. Autorzy artykułu postanowili przedstawić zagadnienie czystości cieczy hydraulicznych oraz jej wpływ na niezawodną pracę serwozaworów. Zanieczyszczenia zostały sklasyfikowane względem źródeł ich pochodzenia oraz wywoływanych skutków. Spośród występujących w serwozaworach procesów zużyciowych, teoretycznej analizie poddano zużycie erozyjne. Dla serwozaworu Vickers SM 4-20-10 wyznaczono maksymalne prędkości przepływu i na tej podstawie określono energię uderzających w krawędzie cząsteczek.

Słowa kluczowe: serwozawór, ISO 4406, zanieczyszczenia, suwak, erozja

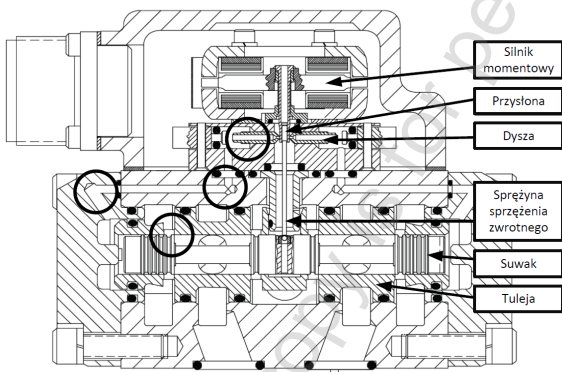
EFFECT OF FLUID CLEANLINESS CLASS FOR THE PHENOMENON OF EROSION OF THE SERVOVALVE METERING EDGES

Abstract. Authors decided to present a hydraulic fluids contamination issue and its influence on the reliable operation of the servo valves. Contaminations were classified relative to their sources, and its effects. Among wear processes occurring in the servovalves, theoretical analysis of erosive wear was performed. For Vickers SM 4-20-10 servovalve set the maximum flow velocity and on this basis the energy of particles hitting the edges.

Keywords: servovalve, ISO 4406, contamination, spool, erosion

Wstęp

Połączenie zaawansowanych układów elektronicznych i hydrauliki siłowej umożliwiło powstanie urządzeń o dużej mocy oraz wysokiej precyzji regulacji, przy zaoszczędzeniu energii i pieniędzy. Takie połączenie występuje w hydraulicznych układach proporcjonalnych i serwoukładach. Układy te posiadają wszystkie zalety kojarzone z hydrauliką siłową, czyli największy we wszystkich maszynach stosunek mocy do masy oraz dużą sztywność elementów wykonawczych (siłowników). Najważniejszą cechą zaadaptowaną z zaawansowanej elektroniki jest możliwość bardzo precyzyjnej ciągłej kontroli i powtarzalności pozycjonowania. Podstawowym elementem każdego serwoukładu jest serwozawór. Serwozawory to wysoce precyzyjne urządzenia pracujące w zamkniętym układzie regulacji (ang. *closed loop*). Sprężeniem zwrotnym najczęściej objęta jest prędkość wysuwu tłoczyska siłownika, położenie tłoczyska lub generowana na nim siła. Dodatkową pętlą sprężenia zwrotnego zawarta jest również wewnątrz konstrukcji serwozaworu. Najczęściej spotykane i stosowane rozwiązania to sprężenie mechaniczne (rys. 1), elektryczne, barometryczne lub mieszane np. serwozawór ze sprężeniem mechaniczno-elektrycznym. Taki rodzaj sprężenia zwrotnego zdecydowanie podnosi precyzję pracy zaworu. Wśród najczęściej stosowanych konstrukcji pierwszego stopnia zaworu wyróżnia się zawory typu dysza przesłona (ang. *flapper nozzle*) (rys. 1), oraz z rurką strumieniową (ang. *jet pipe*) [1, 3, 6, 7].



Rys. 1. Przekrój serwozaworu Vickers SM 4-20-10 [11]

Jako urządzenia bardzo precyzyjne stanowią jedynie 5% światowego rynku zaworów regulujących przepływ cieczy, głównie ze względu na swoją cenę oraz bardzo restrykcyjne wymagania dotyczące klasy żywotności i niezawodności ich pracy. Właściwy dobór klasy czystości cieczy ma istotny wpływ na ponoszone koszty. Warto rozważyć, czy nakłady finansowe przeznaczone na podniesienie klasy czystości cieczy, przełożą się w równomierny sposób na wydłużenie czasu eksploatacji serwozaworów.

1. Zanieczyszczenia w układzie hydraulicznym

Podczas pracy w układzie hydraulicznym wystąpić mogą następujące rodzaje zaburzeń pracy:

- degradacja powodująca powolne pogorszenie podstawowych parametrów pracy, wielkości szczelin sterujących, chropowatości powierzchni,
- awaria katastroficzna, gdy poważnej awarii mechanicznej ulega jeden z podstawowych komponentów powodując dodatkowo zniszczenia pozostałych, działających poprawnie.

Działając prewencyjnie można uzyskać obniżenie ryzyka wystąpienia awarii o około 80%. Przekłada się to zdecydowanie na wydłużenie żywotności komponentów w układzie oraz oszczędność pieniędzy.

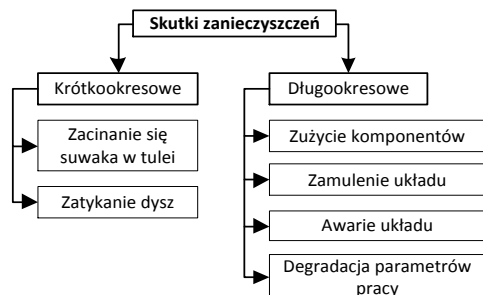
Zanieczyszczenia mogą przedostać się do układu hydraulicznego na pięć sposobów [1, 9, 5]:

- poprodukcyjne, których źródłem mogą być niedokładnie oczyszczone spoiny, nie oczyszczone powierzchnie, które były wcześniej obrabiane, farby, lakiery, kleje, piasek formierski itp.
- pomontażowe, które dostały się do układu podczas procesu montażu, mogą to być kurz, piasek, pasty uszczelniające i inne zanieczyszczenia warsztatowe,
- zewnętrzne dostające się do układu poprzez dławnicę tłoczyska lub korek odpowietrzający na zbiorniku,
- zanieczyszczenia pochodzenia wewnętrznego będące skutkiem różnego rodzaju zużycia występujących podczas pracy osprzętu hydraulicznego,
- dostające się wraz ze świeżą cieczą hydrauliczną ponieważ producenci nie zapewniają wysokiej klasy filtracji swoich produktów, a zanieczyszczenia mogą osiągnąć wielkość nawet 40 μm .

W technice napędów hydraulicznych wyróżnić można cztery rodzaje zanieczyszczeń (w nawiasach skutek oddziaływania):

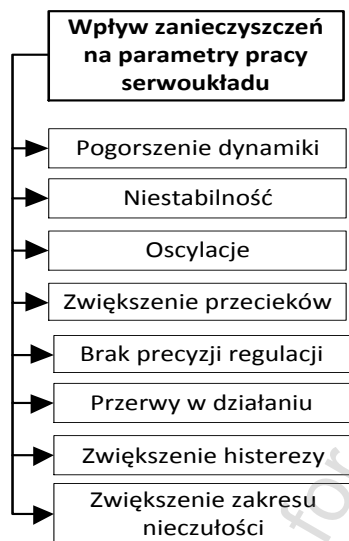
- cząstki stałe (zużycie ściernie i erozyjne)
- woda powyżej zawartości 100-1000 PPM. W cieczy, w tempera turze 273K, woda przestaje się rozpuszczać, tworząc krople (utlenianie się powierzchni),
- powietrze (kawitacja),
- środki chemiczne (degradacja cieczy, powstanie kwasów).

Jednym z następstw niewłaściwej filtracji w układzie hydraulicznym jest powolna degradacja powierzchni i krawędzi sterujących. W wyniku różnego rodzaju procesów zużyciowych takich jak zużycie ściernie, adhezyjne, zmęczeniowe, erozyjne, korozyjne i kawitacyjne powstają kolejne mikrocząstki przyspieszające zapoczątkowane procesy. Luzy na średnicy, na parze suwakowej wynoszą, w zależności od zastosowania i jakości produktu od 4 do 13 μm . Ziarna piasku mogą doprowadzić do zakleszczenia się suwaka w tulei. W najgorszym przypadku zanieczyszczenie ma twardość większą niż elementy składowe zaworu. Od drobnych cząstek (rzędu 5-10 μm), gorsze są te mniejsze (od 1 μm) tworzące muły i osady. Prowadzić to może do zatykania się dysz lub rurki strumieniowej w stopniu sterującym serwowaworu. Skutki zanieczyszczeń podzielono na dwie kategorie: krótko i długookresowe (rys. 2) [5].



Rys. 2. Skutki zanieczyszczeń

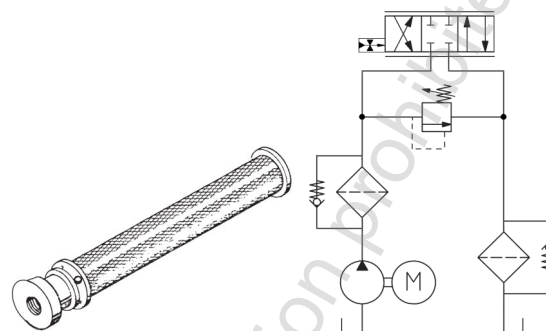
Wśród zużycia długookresowego występuje erozyjna degradacja krawędzi sterujących w parze suwak - tuleja, co w znaczący sposób przekłada się na jakość pracy zaworu. Utracona zostaje kontrola nad precyzją sterowania, zwiększeniu ulegają przecieki wewnętrzne oraz histereza. Degradację parametrów pracy serwoukładów ukazano na rys. 3.



Rys. 3. Wpływ zanieczyszczeń na parametry pracy serwoukładu

Literatura oraz producenci podają różne warianty efektywnej filtracji cieczy. Koniecznym jest, aby zbiornik posiadał zawór odpowietrzający, a układ zasilania był wyposażony w monitoring stanu czystości cieczy. Serwowawór ma wewnętrzny filtr ostatniej szansy, wykonany z metalowej siatki, który gwarantuje ochronę przed cząstkami powyżej wielkości 25 μm . W celu zapewnienia maksymalnej ochrony serwowaworu, układ zasilający powinien składać się z: wysokociśnieniowego filtra na linii zasilającej (10-15 μm), dokładniejszego niskociśnieniowego filtra na splywie, oraz bocznikowego układu filtrującego umieszczonego przy zbiorniku (filtracja na poziomie 3 μm) (rys. 4). Ważne jest też odpowiednie dobranie stopnia filtracji poszczególnych filtrów w zależności od pełnionych funkcji, aby nie doszło do sytuacji w której filtr ostatniej szansy wewnątrz serwowaworu pełni funkcję filtra głównego układu.

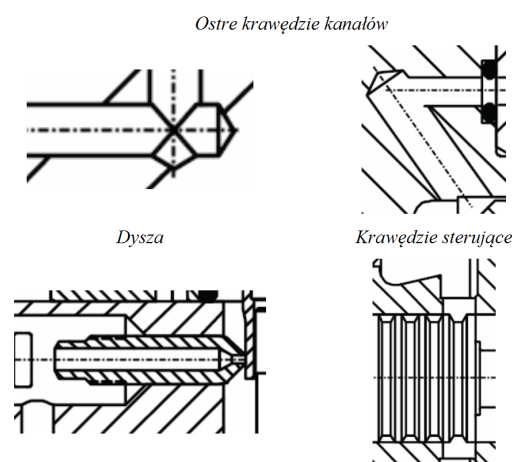
Najwięcej informacji związanych z zagadnieniem filtracji cieczy publikuje firma Vickers. Na podstawie zdobytego na przestrzeni lat doświadczenia doradzają stosowanie stopnia filtracji cieczy na poziomie najmniejszego luzu pomiędzy współpracującymi elementami (mniejszego luzu niż na parze suwakowej serwowaworu nie ma żaden z pozostałych komponentów w układzie hydraulicznym) [9].



Rys. 4. Filtr ostatniej szansy oraz położenie filtrów w układzie hydraulicznym

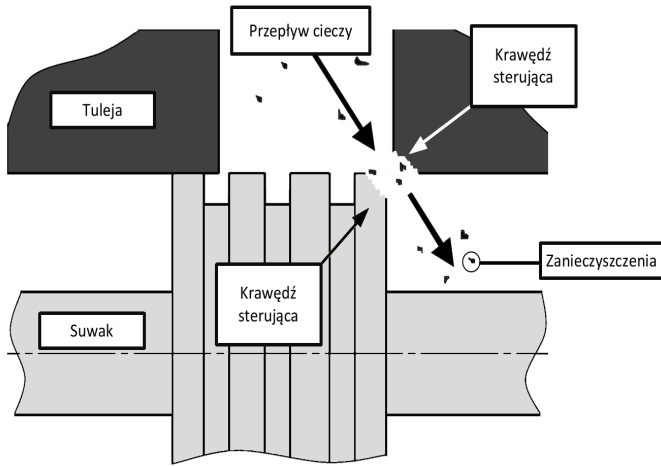
2. Zjawisko erozji i jego wpływ na serwowawór

Jednym z kluczowych rodzajów zużycia wpływającym na przedwczesne zniszczenie serwowaworu, jest zjawisko erozji. Zgodnie z definicją literaturową, erozja to zużycie powstające w wyniku uderzania drobnych cząstek o powierzchnię materiału, powodujące jego ubytek [8]. W przypadku serwowaworu, możemy mówić o zanieczyszczeniu znajdującym się w oleju hydraulicznym, którego przepływ powoduje erozję napotkanych krawędzi [1]. W konstrukcji każdego serwowaworu jest kilka miejsc, które są szczególnie narażone na oddziaływanie erozyjne cząstek stałych (rys. 5). W przypadku wierceń krzyżujących się pod kątem prostym, bardzo niekorzystne z perspektywy eksploatacji są zagłębienia pozostałe po krawędziach skrawających wierteł. Właśnie w tych miejscach następuje nagromadzenie osadów i tworzenie się mułów, które w każdej chwili mogą zatkać dysze serwowaworu. Dla przejść pomiędzy kanałami pod kątem powstają ostre krawędzie szczególnie narażone na erozyjne oddziaływanie zanieczyszczonej cieczy, są one źródłem kolejnych cząstek stałych. W przypadku dyszy bardzo ważnym aspektem jest brak jakichkolwiek odkrytych gwintów na drodze strumienia cieczy. Mogą one zawierać zanieczyszczenia po obróbce, na erozję wystawione są ostre krawędzie zarysu gwintu. Najlepiej, aby dysza była wciskana w korpus (rys. 5).



Rys. 5. Analiza miejsc narażonych na erozję w konstrukcji serwowaworu [11]

Szczególnie istotnym miejscem z punktu widzenia, jakości pracy serwowaworu są jego krawędzie sterujące (rys. 6). Dla serwowaworów możemy przyjąć występowanie przekrycia zerowego lub niewielkiego dodatniego. Maksymalny skok suwaka to 0,8 mm, zazwyczaj są to wartości dużo mniejsze, rzędu 0,1-0,3 mm. W tym miejscu występują największe przepływy cieczy, a energia uderzających w krawędzie cząstek jest największa.



Rys. 6. Erozyjne zużywanie krawędzi sterujących

Znaczący wpływ na szybkość erozji krawędzi sterujących ma ilość cząstek w przepływającej cieczy. Ilość cząstek jesteśmy w stanie oszacować na podstawie klasy czystości cieczy, jaką powinna mieć ciecz hydrauliczna.

3. Klasyfikacja zanieczyszczenia cieczy wg ISO 4406

Aktualną normą odpowiedzialną za klasyfikację zanieczyszczeń cieczy hydraulicznej to ISO 4406:1999. W normie tej przedstawione są trzy podstawowe wielkości cząstek stałych: 4, 6 i 14 μm . Zanieczyszczenia mierzone są na specjalistycznych stanowiskach pomiarowych, wyposażonych w elektroniczne urządzenia testujące. Opisu klasy czystości cieczy dokonuje się na podstawie pomiaru ilości cząstek większych lub równych przyjętym wielkościom. Następnie odczytuje się z tabeli zawartej w normie klasę czystości cieczy, na podstawie ilości wykrytych cząstek o danej wielkości. Parametry ISO 22/18/13 oznaczają, że w cieczy znajduje się od 20000 do 40000 cząstek równych lub większych 4 μm , od 1300 do 2500 cząstek równych lub większych 6 μm , i od 40 do 80 cząstek równych lub większych 14 μm w 1 ml badanej cieczy [10].

W literaturze znaleźć można inny podział cząstek stałych na: 2, 5, 15 μm lub tylko na 5 i 15 μm . Podział ten nawiązuje do starej normy ISO 4406, w której uwzględniano tylko wielkości 5 i 15 μm (np. ISO 13/10). Jeżeli zapis kodu czystości cieczy posiada dwie wartości wyróżnione pogrubieniem oznacza to, że jest zgodna z podziałem 2, 5, 15 μm , np. ISO 16/14/11 [9].

Zalecana wielkość filtracji dla elektrohydraulicznych serwowarów określona jest zazwyczaj przez ich producentów. Najczęściej podawaną klasą czystości cieczy dla serwowarów jest 16/14/11 dla ciśnienia roboczego 210 bar [9, 1, 12, 13].

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie klasy czystości cieczy proponowanej przez producenta wraz z ilością cząstek stałych które mogą się w niej pojawić na 1 ml badanej cieczy [5, 2].

Tabela 1. Ilość cząstek stałych w zależności od klasy czystości cieczy

	2 μm	5 μm	15 μm
Vickers ISO 16/14/11	320 ÷ 640	80 ÷ 160	10 ÷ 20
Rexroth ISO 16/13	-	320 ÷ 640	40 ÷ 80
MOOG ISO 14/11	-	80 ÷ 160	10 ÷ 20
MOOG ISO 13/10	-	40 ÷ 80	5 ÷ 10

4. Energia cząstek zanieczyszczenia

Obliczenia wykonane zostały dla maksymalnego ciśnienia pracy, przy jakim bezawaryjnie może pracować serwowarów. Założono, że przepływ przez szczelinę będzie stały, odpowiada to sytuacji zachowania stałej prędkości silnika hydraulicznego dla obciążenia zmiennego w czasie.

W celu orientacyjnego wyznaczenia prędkości przepływu przez szczeliny serwowarów oraz energii cząstek stałych wykorzystano wzór:

$$Q = C_d \cdot A_0 \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{\rho}\right) \cdot \Delta p} \quad (1)$$

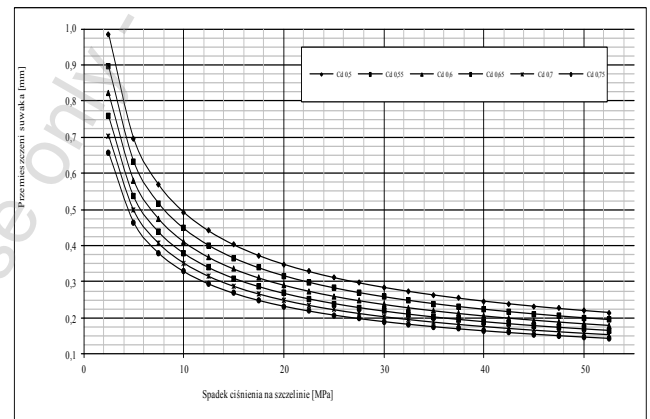
Po przekształceniu:

$$x = \frac{Q}{C_d \cdot \pi d \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{\rho}\right) \cdot \Delta p_{\max}}} \quad (2)$$

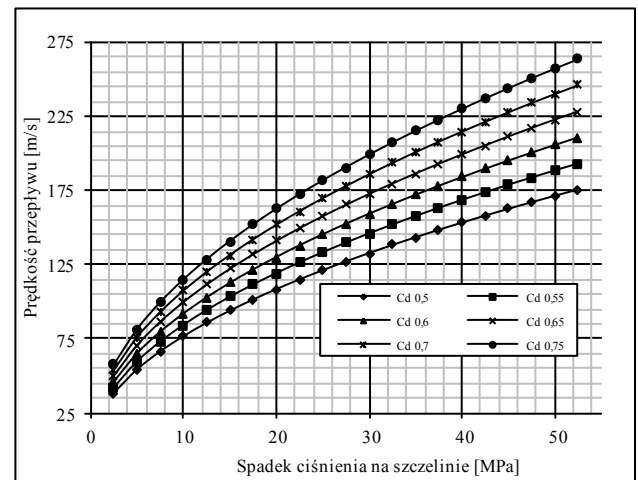
gdzie: Δp – spadek ciśnienia na szczelinie serwowarów [Pa], C_d – współczynnik rozładowania, A_0 ($A_0 = \pi dx$) – pole powierzchni szczeliny [m^2], ρ – gęstość cieczy [kg/m^3], Q – przepływ cieczy przez szczelinę [m^3/s].

Tabela 2. Przyjęte parametry pracy serwowarów

Serwowarów Vickers SM-4-20-10	
Nominalne ciśnienie pracy p_s [MPa]	21
Maksymalne ciśnienie pracy p_{\max} [MPa]	52,5
Przepływ maksymalny Q [dm^3/min]	57
Średnica suwaka d_s [mm]	8
Gęstość cieczy ρ [kg/m^3]	850



Rys. 7. Przemieszczenie suwaka w zależności od spadku ciśnienia



Rys. 8. Prędkość przepływu w zależności od spadku ciśnienia

Efektom prowadzonych analiz teoretycznych jest wyznaczenie przemieszczenia suwaka oraz prędkości przepływu, w zależności od spadku ciśnienia na szczelinie serwowarów, dla różnych wartości współczynnika rozładowania C_d . Na rys. 7 zaobserwować można, że szczelina zmniejsza się dla rosnących wartości C_d oraz

spadku ciśnienia. Wykorzystując wartości przemieszczenia suwaka wyznaczono prędkości przepływu (rys. 8). Maksymalne prędkości przepływu przez szczelinę przy krawędziach sterujących zawierają się w przedziale od 170 do 270 m/s. Znając prędkość przepływu cieczy, wielkość cząstek i ich ilość możemy wyznaczyć szacunkową wielkość energii wszystkich cząstek znajdujących się w strumieniu. Pozwoli to określić, jaką ilość energii mają zanieczyszczenia dla określonej klasy czystości w 1 ml cieczy. Energia cząstek może zostać przetworzona na pracę zniszczenia powierzchni sterujących suwaka i tulei. Ze względu na złożoność problemu erozji krawędzi sterujących, należy przyjąć pewne uproszczenia. Do dalszych obliczeń przyjęto następujące uproszczenia:

- zanieczyszczenia mają kształt kuli o średnicy 5,10,15 μm ,
- zanieczyszczenia są stalowe,
- praca zaworu będzie odbywać się przy maksymalnej różnicy ciśnień, czyli maksymalnej prędkości przepływu,
- cała energia kinetyczna cząstek znajdujących się w przepływającym płynie, uderza w powierzchnie sterujące.

Do obliczeń użyto parametrów zgodnych z tabelą 3.

Tabela 3. Przyjęte parametry do obliczeń

Prędkość przepływu v	[m/s]	263
Wielkość szczeliny sterującej	[mm]	0,143
Przepływ maksymalny Q	[dm ³ /min]	57
Średnica suwaka d_s	[mm]	8
Gęstość stali ρ	[kg/m ³]	7860
Masa kuli o średnicy 5 [μm]	[kg]	3,3x10e-14
Masa kuli o średnicy 15 [μm]	[kg]	1,4x10e-11

Wyniki obliczeń na podstawie powyższych parametrów i zależności opisujących energię masy w ruchu przedstawiono w tabeli 4. Wartości dla danej wielkości zanieczyszczenia odpowiadają minimalnej i maksymalnej ilości cząstek pokazanej w tabeli 1.

Tabela 4. Energia kinetyczna cząstek w zależności od klasy czystości cieczy na 1ml cieczy w [J]

	2 μm		5 μm		15 μm		Suma	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Vickers ISO 16/14/11	4E-07	7E-07	1E-06	3E-06	5E-06	1E-05	7E-06	1E-05
Rexroth ISO 16/13	-	-	6E-06	1E-05	2E-05	4E-05	2E-05	5E-05
MOOG ISO 14/11	-	-	1E-06	3E-06	5E-06	1E-05	6E-06	1E-05
MOOG ISO 13/10	-	-	7E-07	1E-06	2E-06	5E-06	3E-06	6E-06

Tabela 5. Sumaryczna energia kinetyczna cząstek w zależności od klasy czystości dla 8 godzin pracy zaworu w [J]

	2 μm		5 μm		15 μm		Suma	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Vickers ISO 16/14/11	9,972	19,94	38,95	77,91	131,5	262,9	180,39	360,79
Rexroth ISO 16/13	-	-	155,8	311,6	525,9	1052	681,68	1363,4
MOOG ISO 14/11	-	-	38,95	77,91	131,5	262,9	170,42	340,84
MOOG ISO 13/10	-	-	19,48	38,95	65,73	131,5	85,21	170,42

5. Wnioski

Na podstawie tabeli 4 i 5 można zauważyć, że proponowane przez MOOG'a zwiększenie klasy filtracji cieczy z ISO 14/11 do 13/10 powoduje zmniejszenie energii cząstek o 50%. Przyjmując najgorszy możliwy wariant, taki, że całe zanieczyszczenie w cieczy uderza w krawędzie sterujące, spowoduje to dwukrotnie wolniejszą erozję tych powierzchni. Pogorszenie czystości cieczy o dwie klasy z ISO 14/11 na 16/13 powoduje zwiększenie energii skumulowanej w zanieczyszczeniu o 400%. Przyjmując najgorszy możliwy wariant, taki, że całe zanieczyszczenie w cieczy uderza w krawędzie sterujące, spowoduje to czterokrotnie szybszą erozję tych powierzchni. Największą różnicę w ilości energii możemy zauważyć dla klasy czystości ISO 13/10 i 16/13, sięgającą 800%. Wynika z tego, że nawet niewielkie pogorszenie czystości cieczy (1-2 klasy) powoduje kilkukrotne zmniejszenie czasu zużycia krawędzi sterujących suwaka i tulei, a w konsekwencji żywotności całego serwowozoru. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż przedstawione obliczenia ograniczają się do wielkości zanieczyszczeń określonych w normie. W rzeczywistości w cieczy znajdują się mogą zanieczyszczenia między przedziałami 2, 5 i 15 μm . Dla porównania, podczas procesu cięcia tlenkiem aluminium osiągane są prędkości wylotowe cząsteczek rzędu 150-300 m/s, a ich wielkość mieści się w przedziale 15-40 μm . Podczas tego procesu żywotność dysz wykonanych z węgla wolframu wynosi około 12-30 h, czyli następuje bardzo szybko. Jest to uproszczone porównanie, jednak modele zużycia w jednym i drugim przypadku są jednakowe. Różnicą jest ilość cząstek, jakie uderzają w powierzchnie, co wpływa na czas, po jakim następuje degradacja parametrów [4].

Literatura

- [1] Cundiff J.: Fluid power circuits and controls, CRC Press, 2002.
- [2] Ewald R., Hutter J.: Proportional and servo valve technology, Mannesman Rexroth AG, 1989.
- [3] Merritt H.: Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons, New York, 1967.
- [4] Ostwald Phillip F.: Muñoz J., Manufacturing Processes and Systems, John Wiley & Sons, 1997.
- [5] Park R.W.: Contamination control – a hydraulic OEM perspective, MOOG, 1997.
- [6] Pizoń A.: Elektrohydrauliczne analogowe i cyfrowe układy automatyki, WNT, Warszawa 1995.
- [7] Rabie Galal M.: Fluid Power Engineering, Mc Graw Hill, New York 2009.
- [8] Wieleba W.: Analiza procesów tribologicznych zachodzących podczas współpracy kompozytów PTFE ze stalą, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [9] The systemic approach to contamination control, Eaton Corporation, 2002.
- [10] ISO 4406:1999
- [11] <http://www.eaton.com/> - 30.05.2012.
- [12] <http://www.hydac.com/> - 30.05.2012.
- [13] <http://hydraulicspneumatics.com/> - 30.05.2012.

Mgr inż. Bartosz Minorowicz

e-mail: bartosz.minorowicz@doctorate.put.poznan.pl

Autor jest doktorantem w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych. Swoją działalność naukową skupia wokół zagadnień związanych z konstrukcją urządzeń elektrohydraulicznych oraz narzędzi CAx. Największe dotychczasowe osiągnięcia to: Medal Rektora Politechniki Poznańskiej przyznany w 2011 roku oraz wygrana w konkursie NOT na najlepszą pracę dyplomową w Wielkopolsce.



Mgr inż. Frederik Stefański

e-mail: frederik.stefanski@doctorate.put.poznan.pl

Autor jest doktorantem w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych. Swoją działalność naukową skupia wokół zagadnień związanych z konstrukcją urządzeń elektrohydraulicznych oraz wykorzystanie technik wspomaganie komputerowego CAx w projektowaniu maszyn.

