

ANDRZEJ BALAWENDER, LESZEK OSIECKI, PAWEŁ ŚLIWIŃSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny

Nowe prace badawczo-rozwojowe pomp i silników hydraulicznych w Katedrze Hydrauliki i Pneumatyki

1. Wstęp.

Zespół pracowników Katedry Hydrauliki i Pneumatyki od wielu lat specjalizuje się w badaniach rozwojowych pomp i silników hydraulicznych współpracując z producentami oraz oferując również własne rozwiązania konstrukcyjne.

Prace badawcze nad silnikami hydraulicznymi satelitowymi rozpoczęto w latach siedemdziesiątych współpracując z ich głównym wynalazcą inż. Bohdanem Sieniawskim. W efekcie, po przebadaniu w laboratorium Katedry wielu prototypów, firma HYDROSTER w Gdańsku produkuje silniki typu SOK o objętościach roboczych od 100 do 6300 cm³/obr. W wyniku projektu badawczego realizowanego przez Zespół w latach 2000÷2003 firma FAMA w Gniewie podjęła produkcję silników typu HS o podobnym zakresie objętości roboczych lecz przystawianych również do zasilania emulsjami stosowanymi w górnictwie. Zastosowano w nich specjalne rozwiązanie kompensacji luzów osiowych. W laboratorium Katedry prowadzono również badania, produkowanych przez firmę FAMA na potrzeby górnictwa, silników satelitowych typu HF o objętościach od 40÷160 cm³/obr. Wymienione typy silników badano w okresie ich tworzenia i wdrażania a ich zakres obejmował szeroką problematykę oceny własności eksploatacyjnych [1,2,8].

Ostatnio podjęto w Katedrze badania nad nowym typem silników hydraulicznych charakteryzujących się małymi objętościami roboczymi od 5÷73 cm³/obr współpracując z firmą STOSOWANIE MASZYN w Katowicach. Nowy typoszereg silników wypełnia istniejącą dotąd na rynku lukę bardzo potrzebnych silników do napędu przenośnych narzędzi górniczych i innych urządzeń.

Drugim istotnym nurtem prac prowadzonych od kilkunastu lat w Katedrze Hydrauliki i Pneumatyki są badania nad zmniejszeniem strat energetycznych generowanych przez rozrząd pomp wielotłoczkowych osiowych. Efektem tych prac jest opatentowana w kraju i za granicą konstrukcja hydrostatycznie odciążonego rozrządu sterowanego krzywką [5]. Na jej bazie zaprojektowano typoszereg pomp typu PWK, a w latach 2001÷04 w ramach projektu celowego powstały pompy o stałej wydajności PWK-27 i PWK-78, produkowane przez HYDROTOR Tuchola.

Badania laboratoryjne wykazały możliwość pracy tych pomp pod ciśnieniem przekraczającym 40 MPa (w przypadku PWK-27 do 50 MPa) i wysoką sprawność całkowitą sięgającą 93,5÷94% [7]. Do zalet należy także zaliczyć samossawność w szerokim zakresie prędkości i lepkości. Badania laboratoryjne jak i doświadczenia uzyskane w toku eksploatacji nowych pomp w warunkach rzeczywistych potwierdzają również trwałość nowej konstrukcji.

Należy jednak zauważyć, że wysokociśnieniowe pompy o stałej wydajności są z natury wyrobem niższym o niewielkim potencjale rynkowym. Dlatego też strategicznym celem od dawna pozostaje stworzenie pomp z rozrządem krzywkowym o zmiennej wydajności.

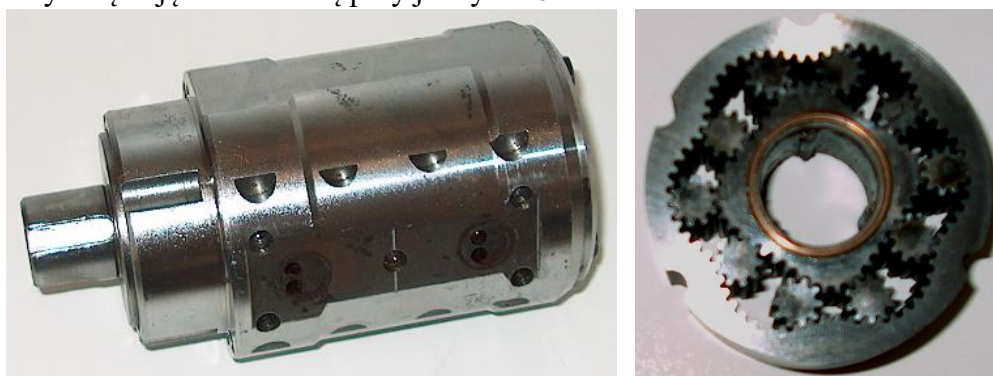
2. Nowy typ silników satelitowych o małych objętościach roboczych.

Na rynku krajowym występował dotąd brak silników hydraulicznych charakteryzujących się wysoką trwałością, małą masą i wymiarami oraz zwiększoną odpornością na zanieczyszczenia cieczy roboczej (cecha cieczy roboczych w górnictwie). Z tego powodu obecnie stosowane w górnictwie hydrauliczne silniki przy zasilaniu emulsją szybko ulegają zniszczeniu. Osiągany czas eksploatacji tych silników jest zwykle bardzo krótki (nawet do około 2 tygodni) i wymagają one ciągłych remontów. Ponadto

silniki te nie są przystosowane do wysokich ciśnień roboczych jakie występują w kopalnianych magistralach zasilających tj.: 25÷30 MPa, gdyż ich dopuszczalne ciśnienia zasilania zwykle nie przekraczają 16MPa.

Wychodząc naprzeciw potrzebom górnictwa i mając na uwadze warunki pracy urządzeń górniczych firma STOSOWANIE MASZYN w Katowicach opracowała i zbudowała małowabarytowe silniki satelitowe typu SM dostosowując je do pracy przy ciśnieniu do 30MPa zarówno przy zasilaniu olejem jak i ubogimi emulsjami HFA-E oraz wodą [9]. Obecnie w Laboratorium Katedry podjęto badania rozwojowe tych silników.

Widok ogólny silnika satelitowego typu SM i jego mechanizm roboczy pokazano na rys.1. Natomiast cały typoszereg silników satelitowych SM podano w tabeli 1. Małe gabaryty silników SM uzyskano dzięki zastosowaniu małych wartości modułu zębów mechanizmu roboczego, tj.: $m=0,4\text{mm}$, $m=0,5\text{mm}$, $m=0,6\text{mm}$, $m=0,75\text{mm}$ i $m=1\text{mm}$. W zależności od modułu uzębienia otrzymuje się pole przekroju poprzecznego komór roboczych. Dobierając wysokość elementów roboczych uzyskuje się żadaną geometryczną objętość roboczą przy jednym obrocie wału.



Rys. 1. Widok ogólny i mechanizm roboczy silnika SM.

Tabela 1. Ogólna charakterystyka techniczna silników SM

Typowielkość	Geometr. objętość robocza	Teoretyczny moment obrotowy przy $p=25\text{MPa}$	Nominalna prędkość obrotowa	Wymiary korpusu (średnica x długość) D x L	Masa
	[cm^3/obr]	[Nm]	[obr/min]	[mm]	[kg]
SM-0.4/10	5,0	19,9	1800	45 x 82	1,02
SM-0.4/15	7,5	29,8		45 x 87	1,08
SM-0.4/20	9,6	38,2		45 x 92	1,14
SM-0.4/25	12	47,7		45 x 97	1,20
SM-0.5/20	12	47,7	1500	54 x 102	1,52
SM-0.5/25	15	59,7		54 x 107	1,60
SM-0.5/30	18	71,6		54 x 112	1,67
SM-0.6/20	17,6	70,0	1200	63 x 108	1,88
SM-0.6/25	22	87,5		63 x 113	1,96
SM-0.6/30	26	103,5		63 x 118	2,05
SM-0.75/20	27,5	109,4	1000	74 x 109	2,22
SM-0.75/25	34	135,3		74 x 114	2,32
SM-0.75/30	41	163,2		74 x 119	2,42
SM-1/20	49	195,1	850	93 x 106	2,71
SM-1/25	61	242,8		93 x 111	2,84
SM-1/30	73	290,6		93 x 116	2,97

Niewielkie wymiary gabarytowe powodują, że silniki satelitowe SM charakteryzują się dużym wskaźnikiem mocy, który określany jest jako stosunek mocy nominalnej silnika do jego masy. Dla silników tych wskaźnik mocy wynosi powyżej 4 kW/kg.

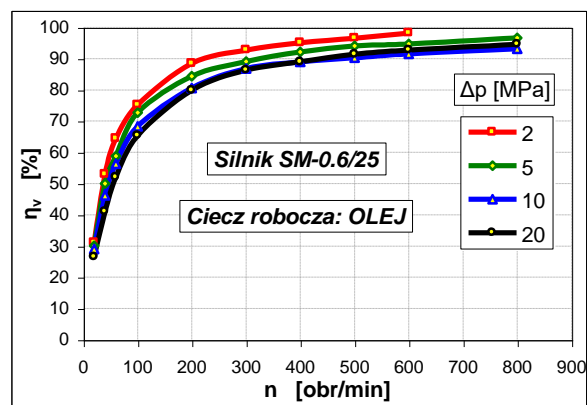
Z dotychczasowych doświadczeń firmy STOSOWANIE MASZYN wynika, że silniki SM użytkowane w kopalniach spełniają oczekiwania większej trwałości w porównaniu do innych znanych silników hydraulicznych, które często zawodzą w trudnych warunkach kopalnianych.

3. Wyniki wstępnych badań silników SM

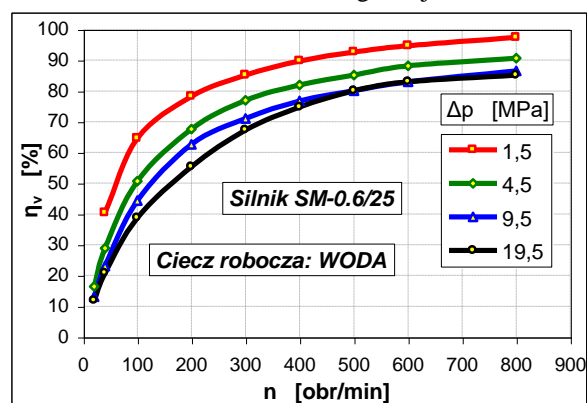
Przeprowadzone dotąd wstępne badania silników typu SM w Katedrze Hydrauliki i Pneumatyki Politechniki Gdańskiej ukierunkowano na sprawdzenie poprawności ich działania oraz na określenie sprawności przetwarzania energii przy zasilaniu olejem mineralnym Total Azolla 46 i przy zasilaniu czystą wodą.

Zasilanie silnika wodą powoduje wzrost strat objętościowych w silniku w porównaniu do strat objętościowych w tym silniku zasilanym olejem. Np. dla silników zasilanych wodą różnica sprawności objętościowych dla spadku ciśnienia $\Delta p=20$ MPa i dla prędkości obrotowej $n=800$ obr/min sięga wartości 15%. Przykładowe charakterystyki sprawności objętościowej silnika SM-0,6/25 przedstawiono na rys. 2 i na rys. 3.

Ogólnie, na podstawie wstępnych badań silników SM, można stwierdzić, że na obecnym etapie rozwoju konstrukcji tych silników charakteryzują się one zupełnie zadowalającymi parametrami. Nie mniej jednak słabą stroną silników SM jest zbyt duży spadek ciśnienia w kanałach wewnętrznych. Duże spadki ciśnienia w kanałach wewnętrznych są cechą szczególną nie tylko silników typu SM ale ogólnie wszystkich silników satelitowych.



Rys. 2. Charakterystyka sprawności objętościowej silnika SM-0,6/25 zasilanego olejem.

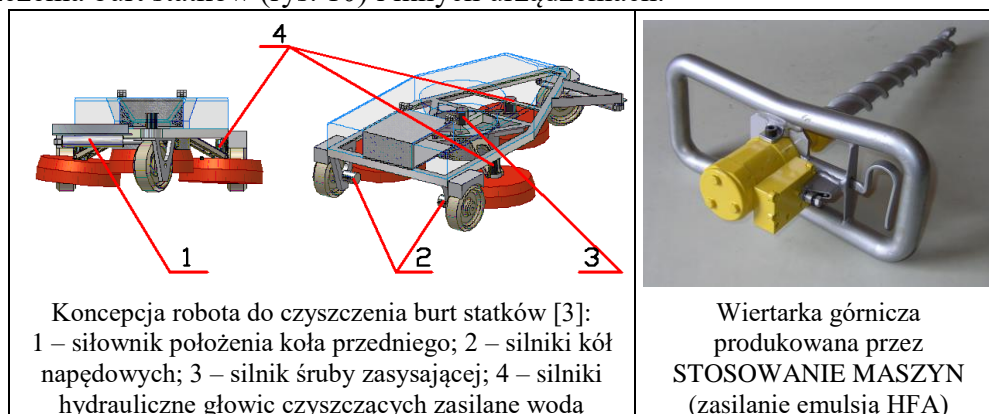


Rys. 3. Charakterystyka sprawności objętościowej silnika SM-0,6/25 zasilanego wodą.

4. Przykłady potencjalnych zastosowań silników typu SM

Ze względu na możliwość stosowania oleju, emulsji i wody obszar zastosowań silników hydraulicznych satelitowych typu SM może być bardzo szeroki, np.:

- w sektorze górniczym do małej mechanizacji robót, tj. do napędu przenośnych pił, zakrętałów, wiertarek kotwicznych, wiertarek obrotowo-udarowych itp. (rys. 4);
- w sektorze spożywczym, np. do napędu urządzeń i przenośnych narzędzi takich jak piły do mięsa;
- zastosowania do ekologicznych prac pod wodą, np.: w hydraulicznych napędach wodnych robotów do czyszczenia burt statków (rys. 10) i innych urządzeniach.



Rys. 4. Przykłady obecnych i potencjalnych zastosowań silników hydraulicznych satelitowych typu SM.

5. Pompy z rozrzędem krzywkowym o zmiennej wydajności

Budowę rozrzędu krzywkowego przedstawiono na rys. 5. Jego zasada działania stwarza wiele możliwości sterowania wydajnością pompy. Pierwsza metoda, polegająca na zmianie skoku tłoczków 5, jest tożsama ze sposobem sterowania wydajnością współczesnych pomp wielotłoczkowych, wyposażonych w rozrząd czołowy. Zastosowanie tej metody w pompach typu PWK napotyka jednak na poważne trudności. Zmiana skoku tłoczka wymaga zmiany kąta nachylenia tarcz oporowych 4, wirujących wraz z wałem 3 i obciążonych ogromnymi siłami pochodzącymi od ciśnienia działającego na tłoczki. Przeprowadzone w Katedrze prace wykazały, że możliwe jest zbudowanie hydraulicznego serwomechanizmu zmieniającego położenie tarczy oporowej 4, byłby on jednak skomplikowany i w znacznym stopniu zwiększałby gabaryty i masę pompy [4]. Mechanizm taki wymagałby również zewnętrznego źródła zasilania w postaci pompy pomocniczej o znacznej mocy, co w istotnym stopniu komplikuje i podraża układ.

Efekt zmiany wydajności można też uzyskać utrzymując stały kąt nachylenia obu tarcz 4 do osi wału 3. Zamiast tego można obracać je względem siebie wokół osi wału, doprowadzając do przesunięcia w fazie ruchów wykonywanych przez oba zespoły tłoczków 5. Wydajność całkowita maszyny będzie się zmieniać zgodnie ze wzorem:

$$Q = Q_{\max} \cdot \frac{\cos \psi_1 + \cos \psi_2}{2} \quad (1)$$

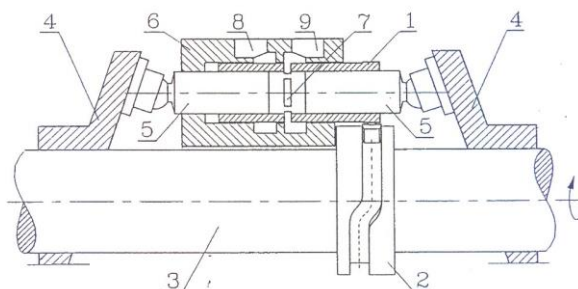
gdzie: ψ_1, ψ_2 - kąty obrotu tarcz 4 względem osi wału 3.

Także i w tym przypadku budowa mechanizmu zmieniającego położenie tarcz na wale napotyka na poważne trudności. Połączenie tarczy z wałem przenosi bowiem zarówno siły osiowe i promieniowe wynikające z naporu tłoczków na tarczę jak też moment skręcający. Cały zespół wykonuje jednocześnie ruch obrotowy. O ile możliwe jest odciążenie omawianego węzła od sił pochodzących od tłoczków i przeniesienie ich na obudowę przez znacznie wzmocnione łożyskowanie, o tyle przeniesienie przezeń momentu skręcającego jest warunkiem działania pompy. W połączeniu z dużym kątem, o który należy obracać tarczę stawia to poważne wyzwanie konstruktorowi.

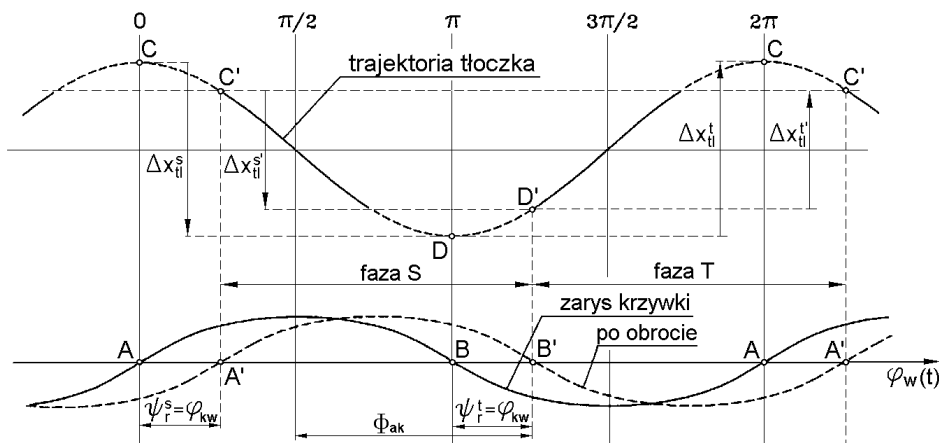
Wydajność jednostek z rozrzędem krzywkowym zależy też od wzajemnego położenia kąтового krzywki sterującej mechanizmem rozrzędu 2 względem tarcz oporowych 4 i jej przesunięcia osiowego względem mostka rozrzędu. W związku z tym przemieszczając krzywkę 2 na wale 3 można sterować wydajnością maszyny. Chociaż krzywka wiruje wraz z wałem pompy, podobnie jak tarcze oporowe, to siły i momenty działające na nią podczas pracy są mniejsze o kilka rzędów wielkości. Dzięki temu konstrukcja mechanizmu zmiany wydajności jest znacznie łatwiejsza.

Metoda ta stwarza kilka możliwości, takich jak: przesunięcie osiowe krzywki, jej obrót względem wału lub złożenie obu tych ruchów. Szczegółowa analiza wad i zalet wskazuje że najkorzystniejszym sposobem sterowania jest obrót krzywki względem wału [6]. Rysunek 6 zawiera graficzną prezentację wpływu kąta obrotu krzywki na wale ϕ_{kw} na przesunięcie w fazie ruchu tulejek rozrzędu względem ruchu tłoczków ϕ_{ak} i zmiany efektywnego skoku tłoczków $\Delta x'_{tl}$. Wzór opisujący zmiany wydajności maszyny w funkcji obrotu krzywki ma postać [6]:

$$Q = Q_{\max} \cdot \sin \phi_{ak} = Q_{\max} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \phi_{kw}\right) \quad (2)$$



Rys. 5. Mechanizm rozrzędu sterowanego krzywką.



Rys. 6. Zmiana efektywnego skoku tłoczka wywołana obrotem krzywki na wale [6].

Obrót krzywki o kąt $\varphi_{kw} > \pi/2$ powoduje zmianę kierunku przepływu cieczy, a więc możliwa jest praca nawrotna (np. w przekładni o obiegu zamkniętym). Zależność zmian wydajności pompy od kąta obrotu krzywki jest jednak nieliniowa.

Poważniejszym problemem są natomiast zjawiska dynamiczne w komorze cylindrowej w trakcie procesu przesterowania, tj. przejścia z fazy tłocznej w ssawną lub odwrotnie. W przypadku tradycyjnych pomp z rozrządem czołowym w momencie przesterowania tłoczki znajdują się w jednym z położen zwrotnych (punkty C i D na rys 6), a zatem ich prędkość jest bliska zeru. Po obrocie krzywki przejścia między fazami przypadają na punkty C' i D', w których prędkość tłoczków jest znacznie większa. Oznacza to że w chwili odcięcia komory cylindrowej od kanałów ssawnego i tłocznego pompy zmiana ulega jej objętość. Rezultatem są niebezpieczne skoki ciśnienia w komorze cylindrowej oraz podwyższona emisja hałasu. Rozwiązaniem problemu może być elastyczna komora kompensacyjna będąca obiektem prac badawczych.

6. Mechanizm zmiany wydajności pompy z rozrządem krzywkowym

Jak już wspomniano, mechanizm rozrządu sterowanego krzywką jest całkowicie odciążony hydrostatycznie, a na krzywkę 2 podczas pracy działają stosunkowo niewielkie siły wywołane tarciami i bezwładnością elementów ruchomych. Oznacza to że zmianę położenia krzywki na wale można zrealizować przy pomocy elementu o małej mocy. Możliwa jest więc eliminacja serwomechanizmu hydraulicznego koniecznego do sterowania wydajnością współczesnych pomp wielotłoczkowych osiowych, których elementy zmiany wydajności są obciążone dużymi siłami.

Eliminacja serwomechanizmu korzystnie wpływa na masę i gabaryty pompy, pozwala też na uproszczenie układu, w którym pompa ta pracuje.

Jedną z tendencji rozwojowych w układach napędu hydrostatycznego jest coraz szersze stosowanie do sterowania sygnałów elektrycznych. Pozwala to wykorzystać ogromne możliwości elektronicznych układów sterowania. Dlatego też elementem obracającym krzywkę ma być silnik krokowy. Moc typowego silnika wystarcza do sterowania wydajnością obciążonej pompy, byłby on przy tym idealnym pośrednikiem między hydraulicznym układem przenoszenia mocy a elektronicznym układem sterującym. Problemem jest jednak mechaniczne połączenie silnika z krzywką, która wiruje szybko wraz z wałem pompy. W ramach podjętych prac stworzono różne kon-



Rys. 7. Pompa z krzywką obracaną przez silnik krokowy.

cepcje takiego połączenia, wymagają one jednak badań laboratoryjnych. Prototyp pompy z mechanizmem obracanej krzywki pokazano na rys. 7.

7. Podsumowanie

Planuje się przeprowadzenie dalszych obszernych badań rozwojowych nad silnikami SM, których zakres będzie obejmował:

- a) analizę konstrukcji, w tym przystosowanie ich do pracy pompowej,
- b) badania tribologiczne materiałów par ciernych mechanizmu roboczego pod kątem stosowania emulsji i wody jako czynników roboczych,
- c) badania trwałościowe,
- d) badania własności silników w zastosowanych urządzeniach górniczych.

Natomiast podjęte obecnie prace nad pompą z rozrządem krzywkowym o wydajności sterowanej sygnałem elektrycznym powinny doprowadzić do powstania działającego prototypu tej pompy w ciągu dwóch lat. Zgodnie z teoretycznymi przewidywaniami pompa taka powinna wykazywać podobne cechy jak istniejące pompy o stałej wydajności typu PWK. Dodatkowo powinna ona osiągać wysoką sprawność podczas pracy ze zredukowaną wydajnością [6]. Wymaga to jednak potwierdzenia doświadczalnego zarówno w laboratorium, jak też w warunkach rzeczywistych.

Drugim obszarem rozwoju jednostek z rozrządem krzywkowym jest powstanie silników wykorzystujących ten mechanizm. Zasada działania nowego rozrządu pozwala zarówno na pracę pompową, jak i silnikową i zostało to potwierdzone doświadczalnie na przykładzie jednostki PWK-27. Co więcej jednostka ta, aczkolwiek projektowana do pracy pompowej, uzyskała w pracy silnikowej wysoką sprawność sięgającą 90% [7]. Zbudowanie silnika o stałej chłonności jest zatem łatwe. Ze strony rynku można także oczekiwać większego zapotrzebowania na wysokociśnieniowe silniki o stałej chłonności, niż ma to miejsce dla pomp o stałej wydajności. Jednakże celem strategicznym jest ponownie silnik o zmiennej chłonności, którego przyszłość jest ściśle uzależniona od wyników prowadzonych obecnie badań.

Literatura

- [1] Balawender A., Śliwiński P., Stryczek J. i inni współrealizatorzy projektu: Badania nad rozwojem silników hydraulicznych satelitowych III generacji. Sprawozdanie z prac projektu badawczego KBN nr 8 T07C 047 20. Politechnika Gdańska, luty 2004r.
- [2] Balawender A. Śliwiński P.: Badania i opis zjawisk nowego typoszeregu silników hydraulicznych satelitowych z kompensacją luzów. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Napędy i sterowania hydrauliczne i pneumatyczne '2005. Problemy i tendencje rozwojowe w pierwszej dekadzie XXI wieku", Wrocław, 17-19 maja 2005, Ośrodek Doskonalenia Kadr SIMP we Wrocławiu, 2005.
- [3] Jasiński R., Melloch M.: Projekt robota do czyszczenia burt statków. Napędy i Sterowanie nr 5/2006.
- [4] Kurek G.: Projekt hydraulicznej pompy z rozrządem krzywkowym i wychylną tarczą. Praca dyplomowa, Politechnika Gdańska, 2007.
- [5] Osiecki A., Osiecki L.: Prace rozwojowe nad nową konstrukcją pomp wielotłoczkowych osiowych. *Hydraulika i Pneumatyka* 4/98, str. 4÷9, Wrocław 1998.
- [6] Osiecki L.: Mechanizmy rozrządu hydraulicznych maszyn wielotłoczkowych osiowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, seria Monografie nr 72, Gdańsk 2006.
- [7] Osiecki L.: Impact of Commutation Unit's Design on Hydraulic Axial Pump's Performance. Materiały Międzynarodowego Sympozjum "Research-Education-Technology", Gdańsk 2005.
- [8] Śliwiński P.: Praca doktorska „Porównanie zjawisk w hydraulicznych silnikach satelitowych zasilanych emulsją wodno-olejową lub olejem”. Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej. Promotor: Balawender A., Gdańsk 2006.
- [9] Zgłoszenie patentowe, nr PT 366267 „Silnik hydrauliczny obiegowy”. Autor zgłoszenia: Szwajca T., dn. 15.03.2004r.

New research and development of hydraulics pumps and motors in Department of Hydraulics and Pneumatics

In Department of Hydraulics and Pneumatics research and development of new type of hydraulics pumps and motors have been conducted for many years. All construction solutions are done in cooperation with industry.

In mining industry for driving hand tools (driller, band-saw, bolting machine, etc) are needed hydraulic motors with small geometrical displacement. Therefore, taking under consideration hard operation conditions in mines, in cooperation with Stosowanie Maszyn company research and development of new type satellite motors SM with small geometrical displacement were taken on. The aim of that research and development is to adapt this motors supplied with oil, oil-in-water emulsion HFA-E and pure tap water to work under pressure up to 30 MPa. Geometrical displacement of new series of types satellite motor SM will be from 5 till 73 cm³/rev. Preliminary research confirms their correct work and satisfactory efficiency of energy conversion. It is necessary to add that overall efficiency of motors type SM is higher than overall efficiency of other hydraulic motors supplied with emulsion HFA-E and supplied with water. Extensive research of that type of motors is planned.

Research program focused on energetic phenomena in hydraulic axial pumps resulted in a new concept of hydrostatically discharged cam-driven commutation unit. Constant displacement pumps equipped with this unit are able to work under high pressure – up to 50 MPa, and their overall efficiency exceeds 93%.

The research works are now aimed at creating variable displacement pump with the cam-driven commutation unit. Displacement of such a pump may be changed in many ways, but the most promising one is rotating the control cam 2 on pump's shaft 3. It leads to changes of the effective stroke of the piston 5 (although it's physical stroke is constant). Such a control causes however strong dynamic phenomena in pump's working chamber. Reduction of that effect by use of elastic compensation volume is now the prime target of research.

Thanks to low forces exerted on the cam it's position may be controlled using low-energy actuators, like stepping motor or proportional electromagnet. It allows to simplify the hydraulic circuit and eliminates heavy and costly hydraulic servo-mechanism, necessary in present pumps. Prototype of the new variable pump was built and it's laboratory tests start now.