

Rozwój konstrukcji pomp satelitowych

Leszek Osiecki

1. Wprowadzenie

Konstrukcja silników satelitowych znana jest od lat 70. ub. w., a rozmaite ich odmiany produkowane są w wielu przedsiębiorstwach. Silniki satelitowe są też od dawna obiektem intensywnych badań prowadzonych na Politechnice Gdańskiej w Zespole Hydrauliki i Pneumatyki. Efektem współpracy z producentami są udoskonalone konstrukcje silników wysokomomentowych, charakteryzujące się m.in. skorygowanym zarysem uzębienia, podwyższonym ciśnieniem pracy dzięki zastosowaniu skutecznej kompensacji luzów osiowych czy odwróconą kinematyką mechanizmu [1, 2].

Nowoczesna technologia wykonywania zarysów za pomocą elektrodrążenia drutowego pozwoliła na wykonywanie mechanizmów z zębami o module 0,4–1,25 mm. Pozwoliło to na uruchomienie we współpracy z firmą Stosowanie Maszyn produkcji typoszeregu wysokoobrotowych silników SM o chłonności 5–32 cm³/obrót (rys. 1) [1]. Silniki te mogą pracować z prędkością obrotową do 1800 obr./min. Zastosowane do ich konstrukcji materiały pozwalają przy tym na pracę silników SM z różnymi cieczami roboczymi, takimi jak: olej mineralny i roślinny, emulsja HFAE czy czysta woda [1].



Rys. 1. Typoszereg silników SM [1]

2. Satelitowe pompy PSM

Parametry osiągnięte przez silniki SM skłoniły do przebadania możliwości wykorzystania mechanizmu satelitowego do pracy pompowej. Na bazie silnika SM skonstruowano pompę PSM (rys. 2), która poddana została wszechstronnym badaniom. Badania potwierdziły możliwość pracy takiej pompy w szerokim zakresie parametrów i z różnymi cieczami roboczymi. Poziom sprawności osiągnięty przez pompę PSM nie ustępuje parametrom współczesnych pomp gerotorowych czy łopatkowych (rys 3 i 4) [4], a po udoskonaleniu mechanizmu kompensacji luzów można oczekiwać, że dorówna on pompom zębatym.

Streszczenie: Artykuł prezentuje budowę i działanie hydraulicznej pompy satelitowej. Zbudowane i przebadane prototypy nowej pompy wykazały się wysokimi parametrami pracy i zdolnością tłoczenia różnych cieczy: oleju, wody i emulsji HFAE. Mechanizm pompy tworzą dwie nieokrągłe uzębione bieżnie: zewnętrzna obwodnica i wewnętrzna planeta oraz umieszczone pomiędzy nimi koła zębate (satelity). Obecny kształt planety i obwodnicy powoduje szybkie zużycie zębów, obniżając trwałość pompy. Aby uzyskać w pełni funkcjonalny produkt, konieczne są zmiany kształtu mechanizmu pompy. Artykuł prezentuje metodę wyznaczania nowego kształtu i wyniki wstępnej analizy.

Słowa kluczowe: pompa satelitowa, mechanizm zębaty, emulsja HFAE, woda, olej

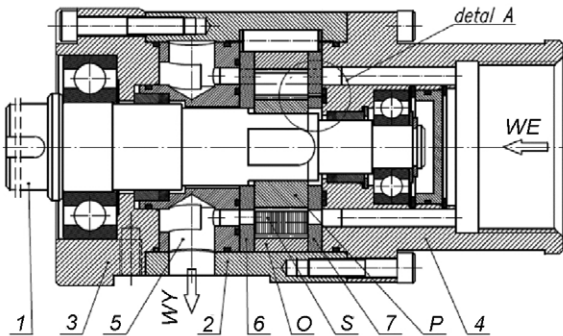
Abstract: The article describes the design and operation of the satellite hydraulic pump. Two versions of the new pump were built and tested, showing good performance and ability to work with different fluids: oil, water and HFAE emulsion. The pump's mechanism consists of a non-circular gear with external teeth (planete), non-circular gear with internal teeth (curvature), and circular gears (satellites) between them. Present shape of the planete and curvature causes fast wear of teeth and reduces pump's durability. To make the pump fully operational changes of the mechanism shape are necessary. Methods of determination of the corrected shape and preliminary results of the analysis are shown.

Keywords: satellite pump, gear mechanism, HFAE emulsion, water, oil

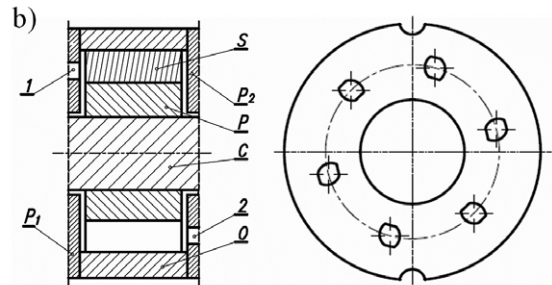
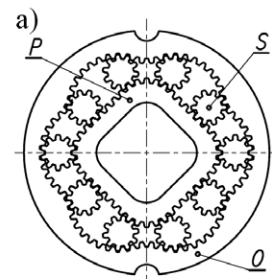
3. Pompy satelitowe o odwróconej kinematyce

Odmianą pompy PSM jest pompa o odwróconej kinematyce. Normalnie w mechanizmach satelitowych wiruje planeta P wraz z satelitami S, podczas gdy obwodnica O pozostaje nieruchoma (rys. 5). Liczba otworów w każdej z płyt rozrządu jest w takiej wersji równa liczbie garbów na nieruchomej obwodnicy. Dla pokazanego na rys. 5 a mechanizmu 4/6 liczba otworów wynosi zatem 6, a ich maksymalny rozmiar pokazano na rys. 5 b [3].

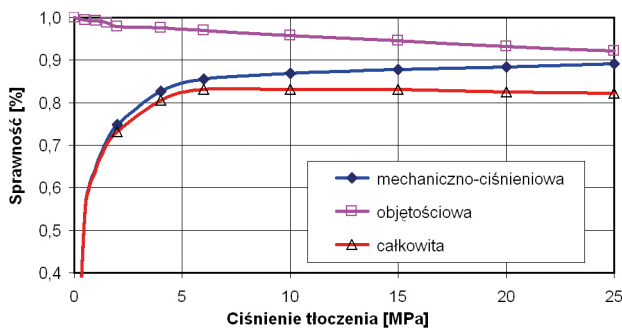
Odwrócenie kinematyki oznacza unieruchomienie planety P i wprawienie w ruch obrotowy obwodnicy O. Zarys planety i obwodnicy nie ulegają przy tym zmianie (rys 6 a), zmienia się za to kształt i liczba otworów w płytach rozrządu (rys 6 b).



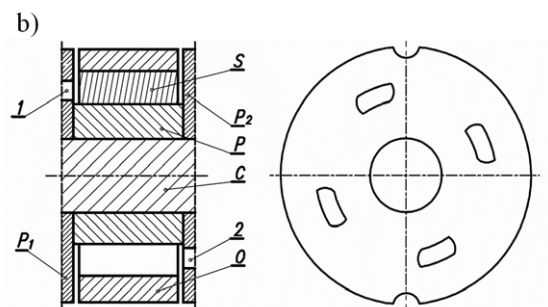
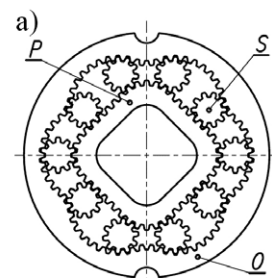
Rys. 2. Pompa PSM: widok zewnętrzny (u góry); przekrój (u dołu) [4]



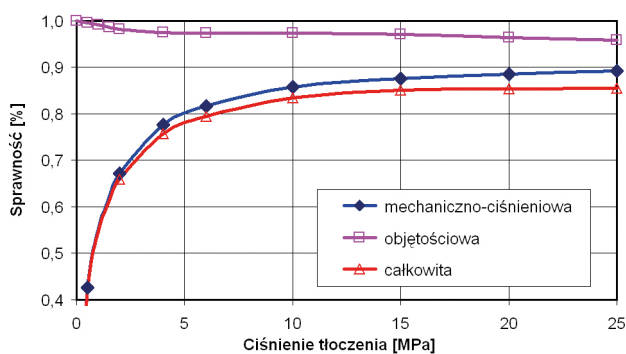
Rys. 5. Pompa z wirującą planetą: a) kształt zarysu: O – obwodnica, P – planeta, S – satelity; b) luzy w mechanizmie i kształt płyty rozrządu [3]



Rys. 3. Wyniki badań pompy PSM przy prędkości 1000 obr./min; ciecz – olej mineralny HG46 [4]

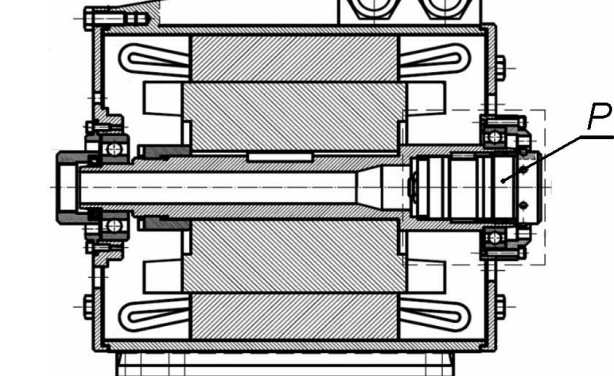


Rys. 6. Pompa z wirującą obwodnicą: a) kształt zarysu: O – obwodnica; P – planeta, S – satelity; b) luzy w mechanizmie i kształt płyty rozrządu [5, 6]



Rys. 4. Wyniki badań pompy PSM przy prędkości 1500 obr./min; ciecz – emulsja HFAE [4]

Liczba otworów w każdej płycie rozrządu maleje do 4 i równa jest liczbie garbów na nieruchomej planetce. Zmniejszeniu liczby otworów towarzyszy jednak ponad 2-krotny wzrost pola powierzchni każdego otworu [5, 6]. Pozwala to ograniczyć straty ciśnienia generowane przez rozrząd pompy.



Rys. 7. Agregat z pompą satelitową o odwróconej kinematyce; widok zewnętrzny (u góry); przekrój (u dołu). P – pompa satelitowa [6]

Dodatkową zaletą pomp satelitowych o odwróconej kinematyce jest możliwość zabudowy takiej pompy wewnątrz silnika elektrycznego. Ze względu na kilkudziesięciokrotnie wyższą gęstość mocy, jaką charakteryzują się maszyny satelitowe w porównaniu do maszyn elektrycznych, ich średnica zewnętrzna jest porównywalna ze średnicą wału typowego silnika klatkowego. Można zatem umieścić pompę satelitową w wydrążonym wale silnika, dzięki czemu powstały w ten sposób agregat pompy charakteryzuje się wymiarami mniejszymi niż sam silnik elektryczny (ze względu na eliminację końcówki wału). Agregat taki został zbudowany i przebadany w Zespole Hydrauliki i Pneumatyki PG (rys. 7).

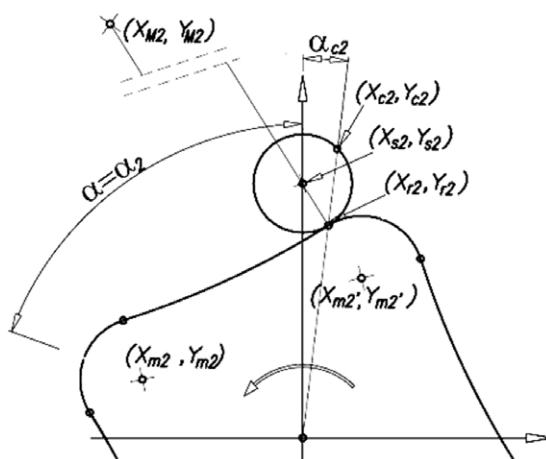
Wyniki badań potwierdziły zarówno poprawną pracę agregatu, jak również zdolność pompy do pracy z cieczami na bazie wody (emulsja HFAE). Sprawność pompy i uzyskiwane przez nią parametry były zbliżone do osiągniętych przez PSM.

4. Problemy techniczne

Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość wykorzystania mechanizmu satelitowego do pracy pompowej w obszarze prędkości i ciśnień typowych dla pomp hydraulicznych. Badania te wykazały jednak, że dla uzyskania pełnowartościowej pompy konieczna jest eliminacja niekorzystnych zjawisk pojawiających się podczas pracy.



Rys. 8. Zazębienie satelity z garbem planety – mechanizm nowy (a); zużycie zębów planety w obrębie garbu (b) [7]

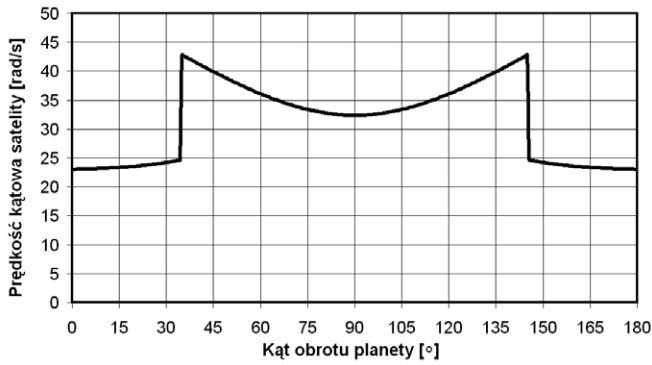


Rys. 9. Linie podziałowe planety i satelity dla obecnego mechanizmu 4/6 [3]

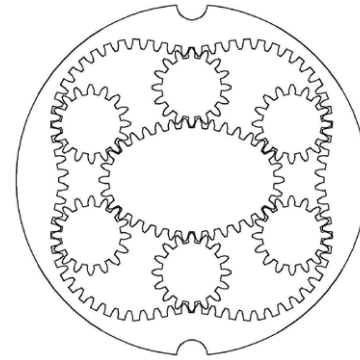
Pierwsze z tych zjawisk związane jest z małym promieniem krzywizny zarysu planety w obrębie jej garbów (rys. 8 a). Niekorzystne warunki zazębienia satelity z planetą powodują przyspieszone zużycie zębów planety, ograniczające trwałość mechanizmu i mogące prowadzić do przedwczesnej awarii pompy (rys. 8 b) [7].

Należy przypomnieć, że wykorzystywane obecnie zarysy mechanizmów satelitowych stworzone zostały z myślą o pracy silnikowej i to w silnikach wolnoobrotowych. Mechanizmy te charakteryzowały się dużym modułem zębów – 1,5 mm lub większym – i pracowały z prędkością obrotową nieprzekraczającą 250 obr./min. W takich warunkach omawiane powyżej zużycie zębów nie miało istotnego wpływu na trwałość maszyny.

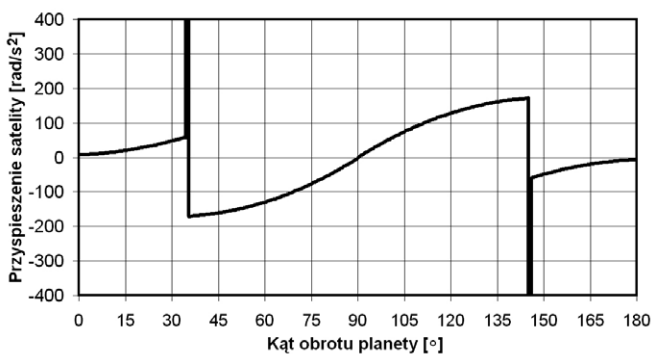
Drugi problem wynika ze sposobu projektowania zarysów mechanizmu. We wszystkich stosowanych obecnie zarysach satelitowych krzywe podziałowe utworzone są z łuków, stycznych do siebie w punktach połączenia. Upraszcza to procedurę wyznaczania kształtów mechanizmu, lecz pociąga za sobą niekorzystne skutki uboczne. Promień krzywizny zarysu w punkcie styku zmienia skokowo swą wartość, a często nawet i znak (rys. 9). W chwili przejścia satelity przez taki punkt mamy do czynienia z gwałtownymi skokami prędkości kątowej i przyspieszenia działającego na satelitę (rys. 10 i 11), a zatem ze zwiększonym obciążeniem współpracujących zębów.



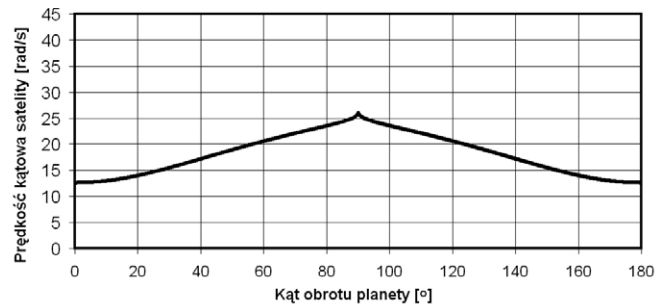
Rys. 10. Zmiany prędkości kątowej satelity obecnego mechanizmu 4/6. Prędkość kątowa planety $\omega = 10 \text{ rad/s}$ [3]



Rys. 12. Przykładowy zarys mechanizmu 2/4 pompy nowego typu



Rys. 11. Zmiany przyspieszenia kątowego satelity obecnego mechanizmu 4/6. Prędkość kątowa planety $\omega = 10 \text{ rad/s}$ [3]



Rys. 13. Zmiany prędkości kątowej satelity nowego mechanizmu 2/4. Prędkość kątowa planety $\omega = 10 \text{ rad/s}$

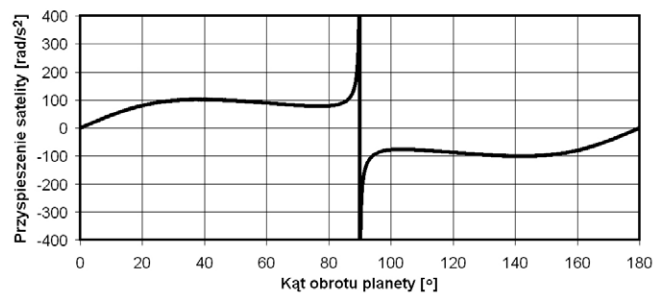
5. Mechanizm o nowym zarysie

Rozwiązaniem obu powyższych problemów może być zmiana zarysu mechanizmu, czyli wyznaczenie nowych linii podziałowych uzębienia naciętego na planecie i obwodnicy. Linie te powinny być opisane jednolitą funkcją matematyczną, spełniającą następujące kryteria:

- promień krzywizny zarysu zmieniający się w sposób ciągły;
- możliwie wysokie wartości minimalnego promienia krzywizny.

Dodatkowo założono, że w odróżnieniu od wszystkich istniejących zarysów nowy zarys będzie projektowany z myślą o pracy pompowej. W tym celu przeanalizowano teoretycznie możliwe mechanizmy satelitowe [8] i wybrano mechanizm 2/4, charakteryzujący się 2-garbną planetą, 4-garbną obwodnicą i posiadający 6 satelitów. W odróżnieniu od dotychczas stosowanych mechanizm taki charakteryzuje się korzystnym stosunkiem wydajności jednostkowej do gabarytów i mniejszą liczbą satelitów, co redukuje ilość cykli obciążenia każdego zęba podczas jednego obrotu planety lub obwodnicy.

Stosowana dotychczas metodyka wyznaczania linii podziałowych nie pozwalała na spełnienie powyższych założeń. Konieczne było zatem stworzenie specjalnego programu służącego obliczaniu nowych zarysów. Program taki powstał, a uzyskane dzięki niemu wyniki potwierdziły możliwość



Rys. 14. Zmiany przyspieszenia kątowego satelity nowego mechanizmu 2/4. Prędkość kątowa planety $\omega = 10 \text{ rad/s}$

tworzenia zarysów spełniających ww. kryteria. Przykładowy kształt nowego mechanizmu pokazano na rys. 12. Porównując uzyskany zarys z zarysem 4/6 pokazanym na rys. 5 i 6, można zauważyć prawie dwukrotny wzrost promienia krzywizny satelity i minimalnego promienia krzywizny planety. Szczegółowa analiza nowego zarysu potwierdza też znaczący spadek skoków prędkości obrotowej i przyspieszenia osiąganego przez satelitę podczas pracy (rys. 12 i 13). Wynika to przede wszystkim z ciągłości zarysów planety i obwodnicy.

Dla pełnego porównania przebiegów przyspieszenia kąto-
wego satelity należy dodać, że szczytowe, niemieszczące się
na wykresie, wartości tego przyspieszenia osiągają dla nowego
zarysu wartości $\pm 1600 \text{ rad/s}^2$, podczas gdy analogiczne warto-
ści uzyskiwane przez stosowany dotychczas zarys 4/6 (rys. 11)
przekraczają $\pm 20\,000 \text{ rad/s}^2$.


6. Podsumowanie

Wstępna analiza potwierdziła możliwość ograniczenia pro-
blemów występujących podczas eksploatacji pomp satelitowych.
Niezależnie od przyjętej kinematyki można oczekiwać wzro-
stu trwałości mechanizmu 2/4 nowego typu w porównaniu ze
stosowanym dotychczas mechanizmem 4/6. Podobne zmiany
można również zastosować w stosunku do szybkoobrotowych
silników satelitowych, w których także pojawia się problem
ograniczonej trwałości. W oparciu o stworzony program moż-
liwe jest wyznaczenie wielu różniących się od siebie zarysów,
które w kolejnym etapie poddane zostaną analizie porównaw-
czej celem wyznaczenia najkorzystniejszej wersji.

Literatura

[1] BALAWENDER A., ŚLIWIŃSKI P. I IN.: *Badania rozwojowe hydrau-
licznych silników i pomp satelitowych o małych objętościach
roboczych zasilanych wodą, emulsją i olejem*. Raport z projektu
badawczo-rozwojowego nr R0300103. Politechnika Gdańska,
Gdańsk 2010.

- [2] PATROSZ P.: *Nowe możliwości generowania zarysów satelito-
wych mechanizmów roboczych*. Międzynarodowa Konferencja
Naukowo-Techniczna „Napędy i sterowania hydrauliczne i pneu-
matyczne 2012”, Wrocław 2012.
- [3] ŚLIWIŃSKI P.: *Satelitowe maszyny wyporowe. Podstawy projekto-
wania i analiza strat energetycznych*. Monografia. Politechnika
Gdańska, Gdańsk 2016.
- [4] ŚLIWIŃSKI P.: *The influence of water and mineral oil on mechani-
cal losses in the displacement pump for offshore and marine appli-
cations*. „Polish Maritime Research”, Special Issue, Vol 25, 2018.
- [5] ŚLIWIŃSKI P., OSIECKI L., PATROSZ P.: *Satelitowy agregat pom-
powy. Od metody elementów skończonych do mechatroniki*. Poli-
technika Gdańska, Gdańsk 2017.
- [6] PATROSZ P., ŚLIWIŃSKI P., OSIECKI L.: *Płynowa maszyna wypo-
rowa z satelitowym mechanizmem roboczym o odwróconej kine-
matyce*. Patent PL 226 516, 2017.
- [7] PATROSZ P., ŚLIWIŃSKI P.: *Compact satellite hydraulic unit. Machi-
nes, Technologies, Materials*. Scientific Technical Union of Mecha-
nical Engineering. Sofia, Bułgaria 2014.
- [8] SIENIAWSKI D.: *Pulsacja chłonności maszyn satelitowych*. Praca
doktorska. Politechnika Gdańska, Gdańsk 1985.

 Leszek Osiecki
Wydział Mechaniczny - Politechnika Gdańska
e-mail: losiecki@pg.edu.pl

artykuł recenzowany