

Preface

On February 17, 2022, the XXXV Scientific Conference "Problems in the Development of Working Machines" took place. This year it was a one-day conference, carried out remotely, forced by epidemiological conditions. The conference was very popular among the scientific and industrial community – it gathered several dozen participants. In the current edition, as in previous years, the Conference was held under the patronage of the Chairman of the Machine Building Committee of the Polish Academy of Sciences. The organizer of the conference was the Faculty of Mechanical Engineering, Bydgoszcz University of Technology. Jan and Jędrzej Śniadecki.

It should be remembered that this is a conference organized cyclically (one-year cycle) starting from 1987. In the memory of the environment around this Conference, the names of the first Presidents of the Scientific Committee of the Conference, animating its existence and functioning, are still remembered. From the very beginning of the Conference, it was prof. dr hab. eng. Stanisław Oziemski (coordinator of the Central Program of Fundamental Research of CPBP No. 02.05), and since 2003 prof. dr hab. eng. Jan Szlagowski. The details of the history of the Conference and a wide kaleidoscope of names of people who contributed to the existence of the Conference can be found on the website of KN PRMR, in the "History of the Conference" tab.

The set of studies presented below is a selection from among the works presented orally during the Conference. It is representative of the scientific issues presented and discussed at the Conference. The organizers of the conference would like to thank the authors of the publications included in this collection for the effort put into their preparation and cooperation in their final editing. Many thanks are also due to the representatives of the Scientific Committee of the Conference, who undertook the task of preparing the review.

Chairman of the Organizing Committee

KN PRMR 2022

Prof. dr hab. eng. Janusz Sempruch

Wybrane rozwiązania kompensacji promieniowych w pompach o zazębieniu wewnętrznym

Piotr Osiński¹, Michał Stosiak¹, Paweł Bury¹, Rafał Cieśliński¹, Krzysztof Towarnicki^{1*}, Piotr Antonia¹, Kamil Urbanowicz², Mykola Karpenko³

¹ Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny; piotr.osinski@pwr.edu.pl, michal.stosiak@pwr.edu.pl, pawel.bury@pwr.edu.pl, rafal.cieslicki@pwr.edu.pl, krzysztof.towarnicki@pwr.edu.pl, piotr.antonian@pwr.edu.pl

² Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki; kamil.urbanowicz@zut.edu.pl

³ Wileński Uniwersytet Techniczny im. Giedymina, Wydział Inżynierii Transportu; mykola.karpenko@vilniustech.lt

* Autor korespondencyjny: krzysztof.towarnicki@pwr.edu.pl

Streszczenie: Obecnie wytwarzane pompy zębate, nad konstrukcją których pracuje się już od ponad czterech wieków, nieustannie są modernizowane i udoskonalane. W pracy przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne z uwzględnieniem ich cech eksploatacyjnych. Przegląd dostępnych rozwiązań kompensacji promieniowej przeprowadzono dla jednostek o zazębieniu wewnętrznym. Szczególną uwagę zwrócono na niedoskonałości pomp związane ze spadkiem wydajności wraz ze wzrostem ciśnienia tłoczenia. W tym celu należy zapewnić możliwie wysoką sprawność objętościową poprzez ograniczenie występujących przecieków, zachowując przy tym możliwie wysoką sprawność hydrauliczno-mechaniczną. Podniesienie sprawności objętościowej pomp wporowych jest ważnym czynnikiem w kierunku podnoszenia ciśnień roboczych w układach hydrostatycznych. Istotnym składnikiem w produkcji pomp jest koszt ich wytwarzania – to kryterium jest zazwyczaj decydujące w kwestii wprowadzania dodatkowych zmian w konstrukcji pomp. Obecnie nasila się trend w zmianach materiałów do budowy pomp, pozwalający na zmniejszenie jej masy lub zmniejszenie wrażliwości na działanie transportowanej cieczy. W prezentowanej pracy przedstawiono autorskie rozwiązanie w tym zakresie, wskazując wyniki badań doświadczalnych.

Słowa kluczowe: pompa zębata, wydajność, zazębienie wewnętrzne, wkładka sierpowa

Selected solutions of radial compensation in pumps with internal gearing

Piotr Osiński¹, Michał Stosiak¹, Paweł Bury¹, Rafał Cieśllicki¹,
Krzysztof Towarnicki^{1*}, Piotr Antoniak¹, Kamil Urbanowicz², Mykola Karpenko³

¹ Wrocław University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering; piotr.osinski@pwr.edu.pl, mical.stosiak@pwr.edu.pl, pawel.bury@pwr.edu.pl, rafal.cieslicki@pwr.edu.pl, krzysztof.towarnicki@pwr.edu.pl, piotr.antoniak@pwr.edu.pl

² West Pomeranian University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics; kamil.urbanowicz@zut.edu.pl

³ Vilnius Gediminas Technical University, Faculty of Transport Engineering; mykola.karpenko@vilniustech.lt

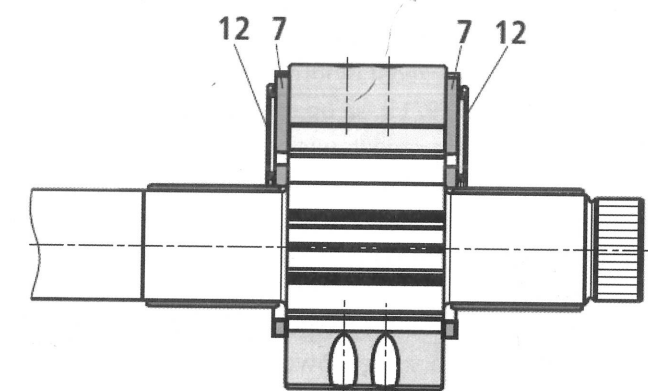
* Correspondent author: krzysztof.towarnicki@pwr.edu.pl

Summary: Currently manufactured gear pumps, which design has been under development for over four centuries, are constantly modernized and improved. The work presents various design solutions with focus on their operational features. A review of the available radial compensation solutions was carried out for units with internal mesh. Particular emphasis was put on the imperfections of pumps related to a decrease in efficiency with a rise in discharge pressure. For this purpose, it is necessary to ensure the highest possible volumetric efficiency by limiting the occurring leaks, while maintaining the highest possible hydraulic-mechanical efficiency. Improvement in the volumetric efficiency of positive displacement pumps is an essential factor in increase of working pressures in hydrostatic systems. An important component in the production of pumps is the cost of their production, which usually leads to the approval of additional amendments to the pump structure. Currently, the intensifying trend of changing materials used in the construction of pumps, allows the reduction of its mass or sensitivity to the action of the transported liquid. This paper presents a proprietary solution in this area, indicating the results of experimental research.

Key words: gear pump, capacity, internal gearing, sickle insert

1. Wprowadzenie

Wyróżnia się następujące rodzaje pomp zębatych: pompy o zazębieniu zewnętrznym i pompy o zazębieniu wewnętrznym. Te pierwsze są znacznie częściej wytwarzane ze względu na ich prostą konstrukcję i niską cenę. Pompy o zazębieniu wewnętrznym mają wiele zalet: emitują mniej hałasu, mają mniejszy współczynnik nierównomierności wydajności oraz bardziej zwartą konstrukcję w porównaniu z pompami o zazębieniu zewnętrznym [1, 2]. Wynika to z płynnej współpracy koła o uzębieniu wewnętrznym oraz koła o uzębieniu zewnętrznym. Charakteryzują się ponadto znacznie mniejszymi niż w przypadku pomp o zazębieniu zewnętrznym stratami podczas napełniania przestrzeni ssawnej w trakcie zasysania cieczy. Powyższe zalety skłaniają do podwyższania ciśnień tłoczenia przez tego typu pompy [3, 4]. Tłoczenie cieczy pod wyższym ciśnieniem wymaga uzyskania wysokiej szczelności wewnętrznej, miarą której jest sprawność wolumetryczna. Podwyższenie sprawności wolumetrycznej w pompie zębatej o zazębieniu wewnętrznym odbywa się poprzez wprowadzenie kompensacji osiowej i kompensacji promieniowej. W pracy przedstawiono wybrane rozwiązania konstrukcyjne wprowadzanych kompensacji promieniowych w pompach o zazębieniu wewnętrznym. Każda pompa z kompensacją promieniową powinna mieć również kompensację osiową. Na rysunku 1 przedstawiono przykład stosowanej kompensacji osiowej w pompie firmy Bosch-Rexroth [5].



Rys. 1. Kompensacja osiowa w pompie o zazębieniu wewnętrznym [5]: 7 – tarcze osiowe, 12 – powierzchnia tarcz, na którą oddziałuje ciśnienie tłoczenia

Fig. 1. Axial compensation in an internal gear pump [5]: 7 – axial discs, 12 – disc surface affected by the discharge pressure

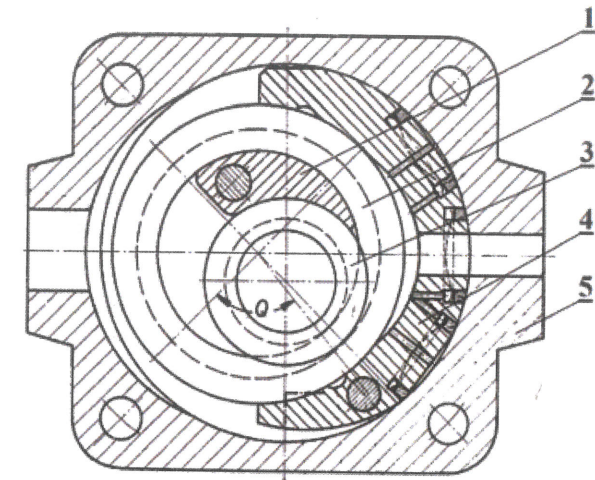
2. Wprowadzone kompensacje promieniowe w pompach o zazębieniu wewnętrznym

Od połowy XX wieku prowadzone są prace nad kompensacją promieniową w pompach zębatych. Firma Otto Eckerle była prekursorem i wiodącym producentem wdrażającym ideę kompensacji luzów promieniowych w pompach o zazębieniu wewnętrznym. W ciągu dekady opatentowała blisko dziesięć różnych koncepcji, które znalazły zastosowanie w pompach o zazębieniu wewnętrznym [6]. Patent nr US3525581 [7] z 1968 r. (rys. 2) zawiera projekt pompy o zazębieniu wewnętrznym wyposażonej w dodatkowy tłok kompensujący (4), którego ruch realizowany jest poprzez zmianę ciśnienia. Siła pochodząca od oddziaływania ciśnienia na powierzchnię powoduje obrót tłoka wokół sworznia mocującego. Tłok napiera na wieniec zębaty, powodując docisk do wkładki sierpowej (1). Dzięki temu następuje zmniejszenie szczeliny między wierzchołkami zębów koła zębatego a bieżnią wkładki. Określa się to kompensacją szczeliny obwodowej. Wynalazek wg patentu nr USRE27901 [8] został opracowany w podobny sposób – tłok powoduje nacisk na wieniec zębaty. Różnica polega na wprowadzeniu elementów sprężystych, które powodują napięcie wstępne, wywierając siłę nacisku przy rozruchu, gdy ciśnienie jest zbyt niskie, aby zrealizować odpowiednią poziomą kompensację szczeliny obwodowej. Poza tym korpus pompy jest wytwarzany mimośrodowo względem wału koła zębatego. Takie wykonanie korpusu powoduje uproszczenie konstrukcji tłoka kompensującego (usunięto kanały prowadzące oraz pomocnicze uszczelnienia przestrzeni, na którą oddziałuje ciśnienie). Konstrukcje wynalazków przedstawionych w patentach nr USRE27904 [9] z 1968 r. oraz US3779674 [10] z 1971 r. są oparte na identycznej koncepcji. Kompensacja szczeliny obwodowej przedstawiona w patencie nr US3912427 [11] z 1974 r. charakteryzuje się znacznie uproszczoną konstrukcją. Usunięto tłok kompensujący, a sama kompensacja została zrealizowana na obwodzie wienca zębatego. Każdemu wierzchołkowi zęba w wienca odpowiada pole kompensacji zlokalizowane na jego obwodzie. Skierowana jest do niego ciecz pod ciśnieniem, powodująca docisk wienca do wkładki sierpowej. W patencie nr US4132515 [12] z 1977 r. przedstawiono kompensację obwodową dokonywaną przez docisk wkładki sierpowej do koła i wienca zębatego.

W ślad za ideą kompensacji promieniowej w pompach firmy Otto Eckerle – podobnie w pompach zębatych o zazębieniu zewnętrznym – wprowadzono elementy kompensujące, dociskane do wierzchołków zębów. Przykładem takich konstrukcji są pompy firmy Bosch (patent nr US3995975 [13] z 1975 r.) i Tyrone Hydraulics (patent nr US4266915 [14] oraz WO8101315 [15] z 1979 r., US4336005 [16] z 1980 r.).

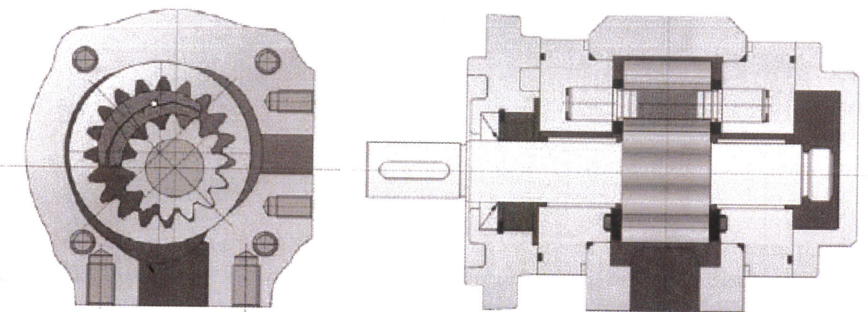
Skutkiem podjęcia kolejnych prac nad kompensacją promieniową było zbudowanie przez firmę ECKERLE prototypowej pompy, którą wprowadzono do masowej produkcji. Maksymalne chwilowe ciśnienie generowane przez tę

pompę osiąga wartość 40 MPa. Poniżej przedstawiono przekrój seryjnie produkowanej pompy firmy ECKERLE (rys. 3).



Rys. 2. Pompa zębata o zazębieniu wewnętrznym z kompensacją luzów promieniowych wg patentu nr US3525581 [7] firmy Otto Eckerle z 1968 r.: 1 – wkładka sierpowa, 2 – wieniec zębaty, 3 – koło zębate, 4 – tłok kompensujący mechanicznie luzy promieniowe, 5 – korpus pompy

Fig. 2. Gear pump with internal meshing with compensation of radial clearances according to the patent no. US3525581 [7] by Otto Eckerle from 1968: 1 – sickle insert, 2 – toothed rim, 3 – toothed wheel, 4 – piston mechanically compensating radial clearances 5 – pump housing



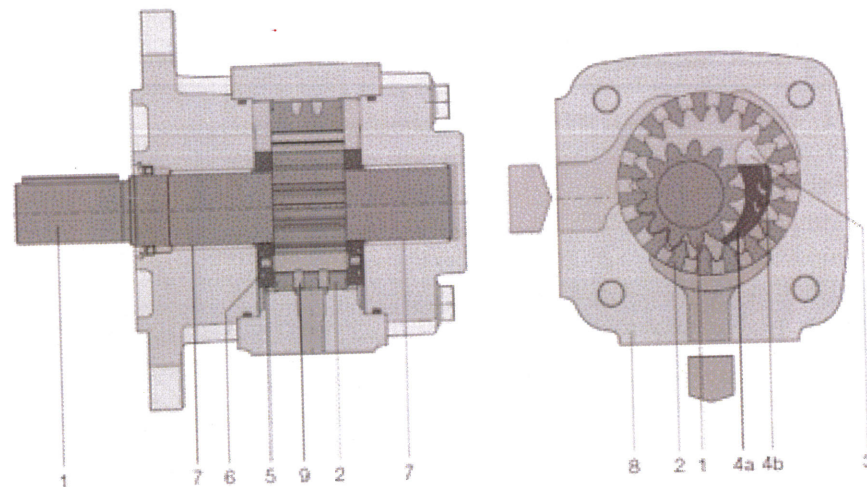
Rys. 3. Widok przekroju pompy o zazębieniu wewnętrznym z kompensacją promieniową [17]

Fig. 3. Cross-sectional view of a pump with internal gearing including radial compensation [17]

Opisane rozwiązanie charakteryzuje się tym, że wkładkę sierpową wykonano z dwóch elementów, podpartych na kołku podczas obrotu. Wahliwe połączenie elementów wkładki powoduje zmniejszenie luzu między bieżnią a wierzchołkami zębów koła zębatego zależnego od wartości ciśnienia tłoczenia. Charakterystyczną cechą rozwiązania jest ukształtowanie komór, w wyniku którego zostały połączone przestrzenie ssawne i tłoczne. Na skutek takiego wykonania kompensacji we wkładce sierpowej uzyskuje się zrównoważenie sił działających na uzębiony pierścień, zależnych od ciśnienia tłoczenia.

Zbliżone rozwiązanie zostało zgłoszone w 2003 r., tak jak powyższe – także w niemieckim urzędzie patentowym przez firmę VOITH. Zastrzeżenia patentu o numerze DE10334954 [18] dotyczą opracowanej wkładki sierpowej zbudowanej z dwóch części ułożonych promieniowo obok siebie. Między elementami wkładki wytworzono przestrzeń, połączoną z komorą tłoczną pompy. Działanie wprowadzonego rozwiązania jest identyczne jak w rozwiązaniu firmy ECKERLE, to znaczy ciśnienie cieczy generowane w przestrzeni tłocznej pompy kierowane jest do przestrzeni pomiędzy wewnętrzną a zewnętrzną częścią wkładki, przez co uzyskuje się docisk bieżni wkładki do wierzchołków kół zębatach, a tym samym – zmniejsza luz promieniowy.

Firma VOITH, wykorzystując powyższe rozwiązanie, wprowadziła na rynek kilka serii pomp; wybrane z nich generują chwilowe ciśnienia do 34,5 MPa. Na rysunku 4 przedstawiono widok pompy firmy VOITH.

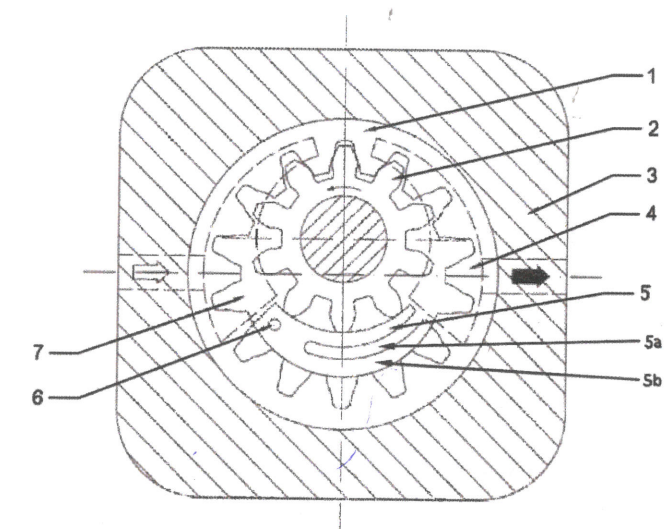


Rys. 4. Widok przekroju pompy o zazębieniu wewnętrznym z kompensacją promieniową firmy VOITH [19]

Fig. 4. A cross-sectional view of a VOITH internal gear pump with radial compensation [19]

3. Wybrane wyniki badań prototypowej pompy o zazębieniu wewnętrznym z modyfikacją wkładki sierpowej

Kolejną metodą uzyskania kompensacji promieniowej – zamiast budowania wkładki sierpowej z wielu elementów – jest wprowadzenie częściowego nacięcia w klasycznej wkładce sierpowej. W wyniku takiej modyfikacji otrzymuje się dwa elastyczne języki, które poddane ciśnieniu od strony przestrzeni tłocznej powodują zmniejszenie luzu między bieżnią wkładki a wierzchołkami koła zębatego. Poniżej przedstawiono widok wprowadzonego rozwiązania patentowego o numerze P.431145 zatwierdzonego przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej (rys. 5).

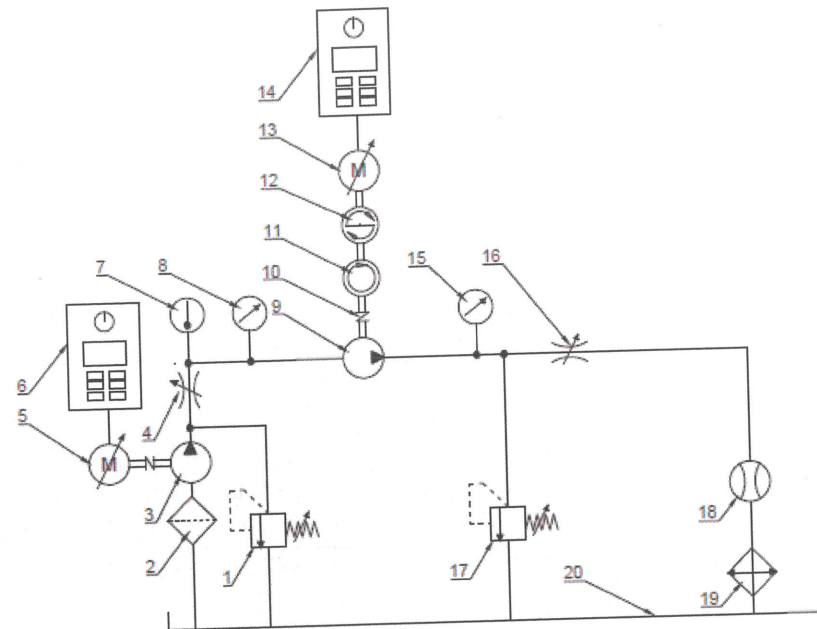


Rys. 5. Przekrój pompy ze zmodyfikowaną wkładką sierpową na podstawie opracowania patentowego P.431145 [20]: 1 – wieniec zębata, 2 – koło zębata, 3 – korpus pompy, 4 – przestrzeń tłoczna, 5 – wkładka sierpowa, 5a – zatoka wewnątrz wkładki sierpowej, 5b – elastyczny język wkładki sierpowej, 6 – kołek ustalający, 7 – przestrzeń ssawna

Fig. 5. Cross-section of a pump with a modified sickle insert based on the patent study P.431145 [20]: 1 – toothed rim, 2 – gear wheel, 3 – pump body, 4 – discharge space, 5 – sickle insert, 5a – bay inside the sickle insert, 5b – elastic tongue of the sickle insert, 6 – locating pin, 7 – suction space

Przedstawiona kompensacja promieniowa powoduje zwiększenie sprawności objętościowej maszyny hydraulicznej. Dzięki temu, że pompy zębata o zazębieniu wewnętrznym osiągają wyższe ciśnienia tłoczenia, zwiększa się zakres ich stosowania [21]. W związku z rosnącym udziałem tworzyw sztucznych w produkcji elementów hydraulicznych układów napędowych [22, 23] oraz ze

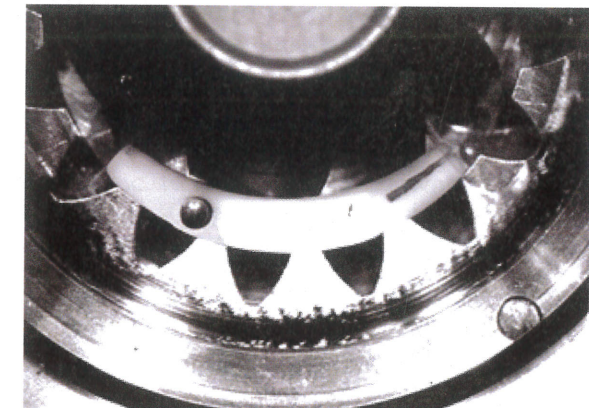
stosowaniem nowych, lekkich i wysoko wytrzymałych materiałów kompozytowych [24] wykonano modyfikację wkładki sierpowej z materiałów o niskim koszcie obróbki. Na rysunku 6 przedstawiono schemat układu hydraulicznego wykorzystywanego podczas badań doświadczalnych.



Rys. 6. Schemat hydrauliczny układu badawczego (opracowanie własne): 1 – zawór bezpieczeństwa pompy zasilającej, 2 – filtr ssawny, 3 – pompa zasilająca, 4 – zawór dławiący na linii ssącej badanej pompy, 5 – silnik elektryczny napędzający pompę zasilającą, 6 – szafa sterująca silnika elektrycznego napędzającego pompę zasilającą, 7 – termometr, 8 – manometr na linii ssawnej badanej pompy, 9 – badana pompa, 10 – sprzęgło, 11 – obrotomierz, 12 – momentomierz, 13 – silnik napędzający badaną pompę, 14 – szafa sterująca silnika elektrycznego napędzającego badaną pompę, 15 – manometr, 16 – zawór dławiący na linii tłocznej badanej pompy, 17 – zawór bezpieczeństwa badanej pompy, 18 – przepływomierz, 19 – chłodnica (wraz ze sterownikiem do stabilizacji temperatury), 20 – zbiornik

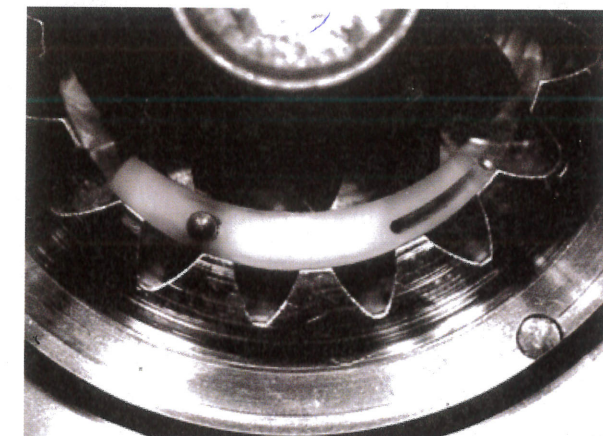
Fig. 6. Hydraulic diagram of the test system (own study): 1 – feed pump safety valve, 2 – suction filter, 3 – feed pump, 4 – throttle valve on the suction line of the tested pump, 5 – electric motor driving the feed pump, 6 – control cabinet of the electric motor driving the feed pump, 7 – thermometer, 8 – pressure gauge on the suction line of the tested pump, 9 – tested pump, 10 – clutch, 11 – tachometer, 12 – torque meter, 13 – motor driving the tested pump, 14 – control cabinet of the electric motor driving the tested pump, 15 – pressure gauge, 16 – throttle valve on discharge line of the tested pump, 17 – safety valve of the tested pump, 18 – flow meter, 19 – cooler (with a controller for temperature stabilization), 20 – tank

Pokrywę tylną pompy wykonano z przezroczystego tworzywa sztucznego, dzięki czemu za pomocą szybkiej kamery podczas pomiarów można było zrobić zdjęcie. Modyfikacja wkładki dotyczyła wycięcia kanału wewnątrz wkładki o wielkości odpowiadającej $\frac{1}{4}$ długości wkładki. Poniżej przedstawiono zdjęcia z pomiarów dla wkładki wykonanej z tworzywa sztucznego POM oraz PA (rys. 7, 8).



Rys. 7. Widok zmodyfikowanej wkładki wykonane z POM – pierwsza modyfikacja. Zdjęcie wykonane przy prędkości obrotowej wału pompy $n = 1000$ [obr/min] (opracowanie własne)

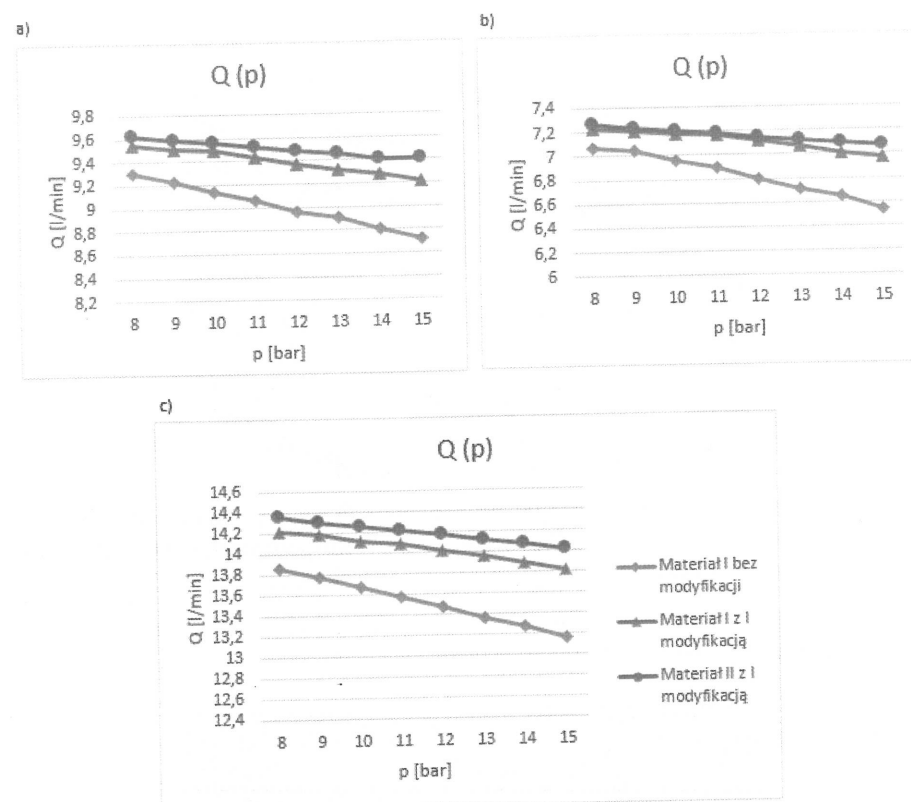
Fig. 7. View of the modified insert made of POM – first modification. The photo was taken with the pump shaft rotational speed $n = 1000$ [rpm] (own study)



Rys. 8. Widok zmodyfikowanej wkładki wykonane z PA – pierwsza modyfikacja. Zdjęcie wykonane przy prędkości obrotowej wału pompy $n = 1000$ [obr/min] (opracowanie własne)

Fig. 8. View of the modified insert made of PA – first modification. The photo was taken with the pump shaft rotational speed $n = 1000$ [rpm] (own study)

Podczas każdej wymiany wkładki sierpowej śruby mocujące elementy korpusu dokręcano momentem tej samej wartości równej 20 [N·m]. Poniżej przedstawiono wyniki z przeprowadzonych badań doświadczalnych (rys. 9).



Rys. 9. Charakterystyki pompy zębatej o zazębieniu wewnętrznym z różnymi wkładkami sierpowymi badanej przy różnych prędkościach obrotowych wału pompy [25, 26]: a) $n = 750$ [obr/min], b) $n = 1000$ [obr/min], c) $n = 1500$ [obr/min]

Fig. 9. Characteristics of a gear pump with internal meshing with various sickle inserts tested at different rotational speeds of the pump shaft [25, 26]: a) $n = 750$ [rpm], b) $n = 1000$ [rpm], c) $n = 1500$ [rpm]

Analizując wyniki, można zauważyć, że wprowadzona modyfikacja pomaga utrzymywać wydajność pompy przy wzroście ciśnienia tłoczenia. Porównując oba materiały, w których wykonano modyfikację, należy stwierdzić, że większą wydajność w stosunku do tych samych ciśnień tłoczenia uzyskują wkładki wykonane z tworzywa sztucznego PA – zapewniają większą szczelność.

4. Omówienie

Bieżące prace dotyczące budowy hydraulicznych układów napędowych ukierunkowane są na generowanie wysokich ciśnień. Konsekwencją takich zmian jest zmniejszenie gabarytów elementów hydraulicznych. Dotyczy to szczególnie średnic tłoka i cylindra siłownika hydraulicznego. Zalety takiego rozwiązania to wzrost współczynnika przenoszonej mocy do masy oraz zmniejszenie natężenia przepływu cieczy w układzie przy zachowaniu tej samej prędkości odbiornika. Nieuniknione zatem staje się wytwarzanie pomp generujących znacznie wyższe ciśnienia tłoczenia przy zachowaniu wysokiej sprawności całkowitej. Wyższe ciśnienia powodują zwiększenie nacisków na elementy pomp, w konsekwencji prowadząc do zmniejszania sprawności hydrauliczno-mechanicznej poprzez zwiększone tarcie współpracujących elementów. Z tego względu wykonano prototypową wersję kompensacji promieniowej w pompie o zazębieniu wewnętrznym z wkładką wytworzoną z tworzywa sztucznego. Przedstawione rozwiązanie pozwala zwiększyć wydajność przy wyższych ciśnieniach tłoczenia w stosunku do pompy bez wykonanej modyfikacji we wkładce sierpowej. Są to wstępne badania pompy prototypowej. Trudno więc mówić na razie o trwałości takiego rozwiązania. Unikalne wartości przedstawionej modyfikacji zostały potwierdzone patentem o numerze P.431145 [22]. Zbliżone koncepcje kompensacji promieniowych przedstawione w tej pracy potwierdzają słuszność dalszych prac badawczych, które powinny zmierzać w kierunku optymalizacji kształtu oraz wielkości wykonanego kanału.

5. Podsumowanie

Pompy zębate o zazębieniu wewnętrznym stają coraz bardziej popularne, gdyż ich hałaśliwość podczas pracy jest znacznie niższa w stosunku do pomp o zazębieniu zewnętrznym. Dzieje się tak głównie z powodu dużego stopnia pokrycia zębów oraz mniejszych niż w przypadku pomp o zazębieniu zewnętrznym strat napełniania. Zastosowanie elementów z tworzywa sztucznego, przy zachowaniu wysokiej sprawności wolumetrycznej wraz ze wzrostem wartości generowanego ciśnienia, pozwoli na wykorzystanie tego typu pomp w przemyśle spożywczym oraz farmaceutycznym.

Bibliografia

- [1] Stryczek, J., „Koła zębate maszyn hydraulicznych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [2] Kędzia, K., „A Method of Determining Optimal Parameters for the Secondary Energy Source of a Multisource Hydrostatic Drive System in Machines Working in Closed Spaces”, *Energies* 15(14), 5132, 2022.

- [3] Rundo, M., "Theoretical flow rate in crescent pumps", *Simulation Modelling Practice and Theory* 71, 1–14, 2017, doi:10.1016/j.simpat.2016.11.001.
- [4] Lambeck, R., "Hydraulic pumps and motors", Marcel Dekker INC, New York 1983.
- [5] Katalog produktowy pomp o zazębieniu wewnętrznym PGH 3X firmy Bosch-Rexroth.
- [6] Osiński, P., „Wysokosprawnościowe pompy zębate”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2019.
- [7] Eckerle, O., Patent US nr 3525581, Wear and tear-compensating high-pressure gear pump, 1967, <https://patents.google.com/patent/US3525581A> (dostęp: 12.04.2022).
- [8] Eckerle, O., Patent US nr RE27901, Wear (and tear) compensating high-pressure gear pump, 1974, <https://patents.google.com/patent/USRE27901E> (dostęp: 12.04.2022).
- [9] Eckerle, O., Patent US nr RE27904, Wear (and tear) compensating high-pressure gear pump, 1974, <https://patents.google.com/patent/USRE27904E> (dostęp: 12.04.2022).
- [10] Eckerle, O., Jung, R., Patent US nr 3779674, High-pressure gear pump, 1973, <https://patents.google.com/patent/US3779674A> (dostęp: 12.04.2022).
- [11] Eckerle, O., Jung, R., Patent US nr 3912427, 1975, <https://patents.google.com/patent/US3912427A> (dostęp: 12.04.2022).
- [12] Eckerle, O., Patent US nr 4132514, High pressure hydraulic pump and motor, 1976, <https://patents.google.com/patent/US4132514A> (dostęp: 12.04.2022).
- [13] Bosch, P., Patent US nr 3995975, Gear pump, 1974, <https://patents.google.com/patent/US3995975A> (dostęp: 12.04.2022).
- [14] McBurnett, J.R., Eley, J.M., Patent US nr 4266915, Gear pumps and motors, 1978, <https://patents.google.com/patent/US4266915A> (dostęp: 12.04.2022).
- [15] Eley, J.M., Joyce, A., Patent WO nr 8101315, Contaminant resistant gear pumps and motors, 1979, <https://patents.google.com/patent/WO1981001315A1> (dostęp: 12.04.2022).
- [16] McBurnett, J., Eley, J.M., Patent US nr 4336005, Gear pumps and motors, 1979, <https://patents.google.com/patent/US4336005A> (dostęp: 12.04.2022).
- [17] Katalog produktowy pomp o zazębieniu wewnętrznym EIPH2 firmy ECKERLE HYDRAULIC DIVISION.
- [18] Arbogast, F., Peiz, P., Patent DE nr 10334954, Hydropumpe, 2003, <https://patents.google.com/patent/DE10334954A1> (dostęp: 12.04.2022).
- [19] Katalog produktowy pomp o zazębieniu wewnętrznym IPVA firmy VOITH GROUP.
- [20] Towarnicki, K., Stosiak, M., Patent PL431145A1, Pompa zębata o zazębieniu wewnętrznym z kompensacją luzów promieniowych, 2022, <https://patents.google.com/patent/PL431145A1> (dostęp: 12.04.2022).

- [21] Lewis, E.B., Cyndi, H., "Selecting internal gear pump for difficult duties", *World Pumps* 462, 26–27, 2005.
- [22] Stryczek, J., *et al.*, "Gerotor pump with POM gears: design, production technology, research", *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14(3), 391–397, 2014.
- [23] Stryczek, J., *et al.*, "The fluid power elements and systems made of plastics", *Procedia Engineering* 176, 600–609, 2017.
- [24] Błażejowski, W., *et al.*, „Zastosowanie nowych materiałów w elementach i układach hydraulicznych”, [w:] Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Napędy i Sterowania Hydrauliczne i Pneumatyczne: stan, potrzeby, oczekiwania i możliwości. Maszyny robocze, górnicze, budowlane i technologiczne, Zamek Kliczków – Wrocław, 2017/2018.
- [25] Antoniak, P., *et al.*, "Preliminary testing of the gear pump with internal gearing with modification of the sickle insert", [w:] *Engineering Mechanics, 25th International Conference*, Svratka, Czech Republic, 2019.
- [26] Antoniak, P., *et al.*, "Preliminary testing of the internal gear pump with modifications of the sickle insert", *Acta Innovations* 32, 84–90, 2019.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).