

# Badania dynamicznych przebiegów ciśnienia w pompach wporowych z wykorzystaniem czujników piezoelektrycznych

Piotr Osiński, Piotr Patrosz

## Układ pomiarowy

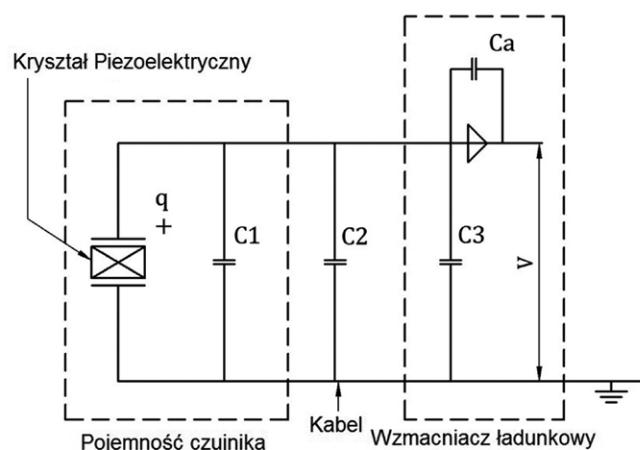
Badania dynamicznych przebiegów ciśnienia w pompach wporowych przeprowadzono, wykorzystując czujniki piezoelektryczne [1, 4, 5]. Wybór tego typu czujnika ciśnienia podyktowany jest niewielkimi rozmiarami, które pozwalają na łatwe umiejscowienie czujnika w pompach o zwartej budowie. Dodatkowo czujniki z sensorami piezoelektrycznymi cechują się niewielką histerezą, są mało podatne na zmiany związane ze starzeniem się oraz umożliwiają bezpośrednie przetwarzanie ciśnienia na napięcie. W odniesieniu do innych metod pomiarowych czujniki piezoelektryczne są precyzyjne, o szerokim zakresie dynamiki pomiarowej od ułamków paskali do setek megapaskali, przy zapewnieniu wysokiego stosunku sygnału do szumu na poziomie 120 dB. Czujniki z kryształami piezoelektrycznymi reagują na zmiany ciśnienia o częstotliwościach do 100 kHz i są obecnie jednymi z najszybszych przetworników. Wszystkie przetworniki piezoelektryczne wykorzystują zjawisko powstawania potencjału elektrycznego wewnątrz kryształów amorficznych wraz ze zmianą ich naprężeń. Zatem w wyniku zmian ciśnienia kryształ znajdujący się w czujniku generuje ładunek, który przekazywany jest do wzmacniacza ładunkowego. Podstawową funkcją wzmacniacza jest zamiana wysokoimpedancyjnego sygnału na niskoimpedancyjny sygnał napięciowy przeznaczony do późniejszej rejestracji. Dodatkowo poprawnie dobrany wzmacniacz powinien cechować się małą pojemnością wejściową dla zapewnienia dużej czułości oraz znaczną rezystancją wejściową w celu zapewnienia małego upływu.

W efekcie końcowym przetwornika piezoelektrycznego nie można bezpośrednio podłączyć do przyrządu pomiarowego ze względu na dużą rezystancję wejściową, która powinna być transformowana przez specjalne układy elektroniczne do niskiej impedancji na wyjściu. Tylko takie rozwiązanie zapewnia prawidłową współpracę z przyrządami pomiarowymi i analizującymi.

Każdy z elementów znajdujących się w opisanym torze pomiarowym posiada pewną pojemność  $C$ , w której następuje gromadzenie ładunku elektrycznego. Ładunek ten ulega „wyciekowi” w czasie, a prędkość jego upływu zależy przede wszystkim od rezystora sprzężenia zwrotnego i kondensatora we wzmacniaczu ładunkowym. Zjawisko to powoduje charakterystyczną wykładniczą deformację przebiegu zmian ciśnienia rejestrowanego za pośrednictwem czujnika piezoelektrycznego. W efekcie tego zjawiska zarejestrowany sygnał ma nieco inny

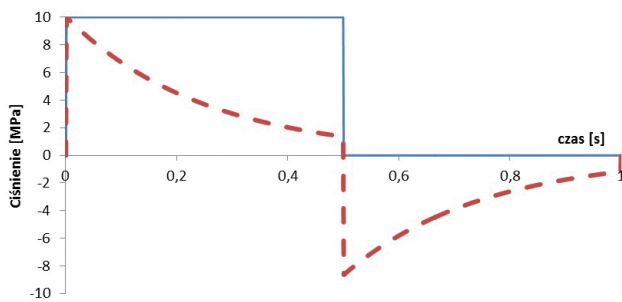
**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań przebiegów ciśnień w pompie zębatej i wielotłoczkowej, przeprowadzonych z wykorzystaniem piezoelektrycznych czujników ciśnienia. Przedstawione wyniki są efektem realizowanych prac badawczo-rozwojowych na Politechnikach Gdańskiej [9] oraz Wrocławskiej [1–5].

**Abstract:** This article presents the results of research pressure pulsation in gear pump and axial piston unite. The research was conducted using a piezoelectric pressure sensors. The presented results are the effect of ongoing research and development in Technical University of Gdansk [9] and Wrocław [1–5].



- q – ładunek
- C1 – pojemność kryształu
- C2 – pojemność kabla
- C3 – pojemność wejściowa wzmacniacza
- Ca – pojemność sprzężenia zwrotnego

Rys. 1. Schemat systemu ładunkowego



Rys. 2. Porównanie przebiegu ciśnienia rzeczywistego i zmierzonego czujnikiem piezoelektrycznym (linia ciągła – przebieg rzeczywisty; linia przerywana – przebieg zmierzony)

przebieg niż sygnał rzeczywisty, co przedstawiono poglądowo na rys. 2. Ładunek dodatni powstaje przy wzroście ciśnienia, a ujemny przy spadku. Zarówno jeden, jak i drugi ładunek gromadzone są w obwodzie układu pomiarowego, a następnie ulegają stopniowemu rozładowaniu. Czas upływu (rozładowania) ładunku w czasie można opisać wzorem (1).

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1)$$

gdzie:

$U$  – napięcie mierzone;

$U_0$  – napięcie w chwili rozpoczęcia rozładowania;

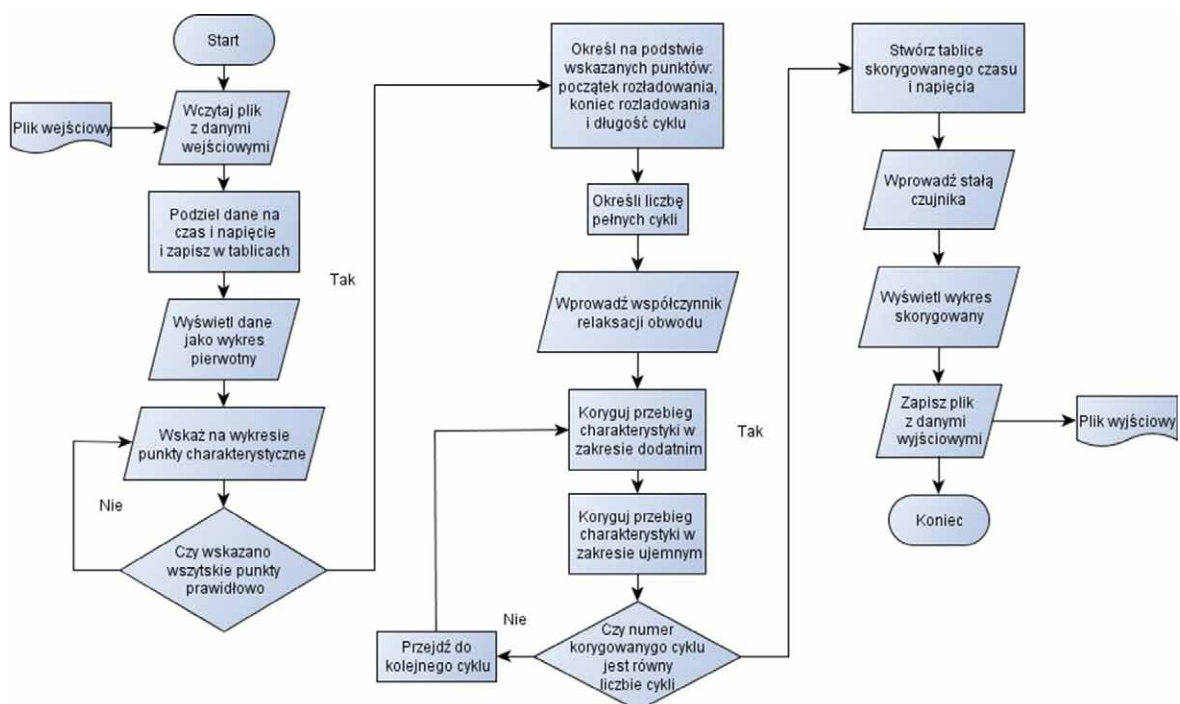
$t$  – czas mierzony od początku rozładowania;

$RC$  – współczynnik relaksacji obwodu.

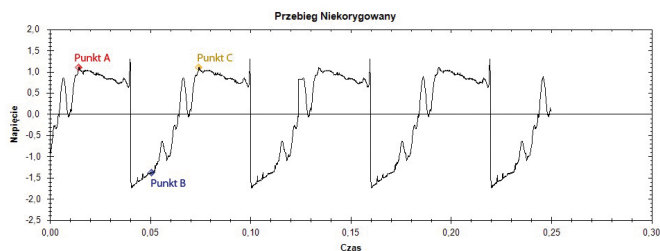
Przy wykorzystaniu znajomości zjawiska rozładowania kondensatora możliwe jest takie skorygowanie przebiegu zmierzonego, aby odtworzyć przebieg rzeczywisty. Z uwagi na to, że „ręczne” przeprowadzenie procesu odzyskiwania przebiegu rzeczywistego byłoby bardzo pracochłonne, skorzystano z programu komputerowego Piezokorektor\*, pozwalającego na przeprowadzenie numerycznej korekcji tego procesu, co skraca czas obróbki analizowanego sygnału pomiarowego.

### Opis programu Piezokorektor

Kod źródłowy oprogramowania został napisany w języku C# pod platformę „.NET Framework”. Język C# pozwala na programowanie obiektowe, które znacznie upraszcza kod, a także pozwala na wielokrotne wykorzystywanie wcześniej przygotowanych metod, co skraca czas przygotowania aplikacji. Program Piezokorektor działa według algorytmu przedstawionego na rys. 3. Po uruchomieniu programu wczytywane są dane z pliku wskazanego przez użytkownika. Plik ten jest przetwarzany w taki sposób, aby usunąć z niego informacje zbędne dla działania programu, a także zamienić kropki rozdzielające miejsca dziesiętne na przecinki i ujednoczyć jednostki, w jakich podawane są dane. Tak zmodyfikowane dane zapisywane są do dwóch tablic: czasu i napięcia, które z kolei wykorzystywane są do wyświetlenia wykresu przedstawiającego przebieg pierwotny (nieskorygowany). Następnie program wymaga od użytkownika wskazania na wykresie punktów charakterystycznych (rys. 4). Punkty A, B i C wskazują odpowiednio początek pierwszego cyklu, koniec „rozładowania” w zakresie ujemnym i początek cyklu drugiego. Jeśli wszystkie punkty zostaną wskazane przez użytkownika poprawnie, to po naciśnięciu przycisku „KORYGUJ” program na ich podstawie określi początek



Rys. 3. Schemat blokowy działania programu Piezokorektor



Rys. 4. Położenie punktów charakterystycznych na przykładowym wykresie niekorygowanym [5]

rozładowania, koniec rozładowania, długość cyklu oraz liczbę pełnych cykli (od punktu A do punktu C). Wykorzystując te informacje, program koryguje najpierw zakres dodatni, powiększając go o wartość wynikającą z przekształconego wzoru (1), a następnie koryguje zakres ujemny, a także podnosząc wartości w całym przebiegu tak, aby ciśnienie nie spadało poniżej zera. Proces korygowania jest powtarzany dla każdego pełnego cyklu osobno, aż do wyczerpania wszystkich danych wejściowych. Jeśli skorygowane zostały już wszystkie cykle zmiany ciśnienia w przebiegu, program wczytuje wprowadzoną przez użytkownika stałą czujnika, przekształca sygnał napięciowy na ciśnienie i wyświetla efekt korekty na wykresie. Jeśli użytkownik zdecydował, że korekta spełnia jego wymagania, może zapisać go do pliku tekstowego z rozszerzeniem „\*.txt”.

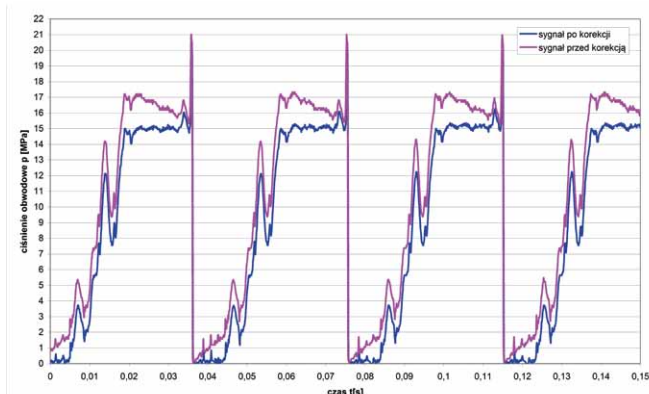
### Przykładowe wyniki badań

Przykład przebiegu czasowego sygnału przed i po przeprowadzeniu numerycznej korekty przedstawiono na rys. 5. Wykres przedstawia dwa przebiegi ciśnienia obwodowego zarejestrowane dla pompy wzorcowej PZ4-32 oraz jednostki prototypowej z kompensacją luzów obwodowych o kącie opasania  $\varphi_c = 130^\circ$ . Pompy obciążone były ciśnieniem  $p_t = 15,0$  MPa oraz pracowały z prędkością obrotową  $n = 1500$  obr./min [5]. Ciśnienie po stronie ssawnej utrzymywane było na poziomie  $p_s = 0,2$  MPa.

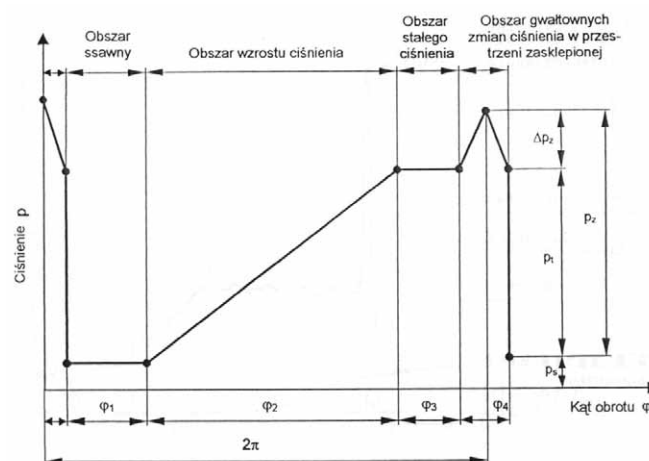
Dla przytoczonego przebiegu błąd pomiaru ciśnienia spowodowany nieuwzględnieniem efektu upływu ładunku wynosił 14%. Większe błędy uzyskuje się dla ciśnień niższych oraz dla mniejszych prędkości obrotowych. Mogą one wówczas wynosić sto, a nawet więcej procent [5]. W związku z powyższym wykonanie numerycznej korekty, uwzględniającej efekt rozładowania kondensatora, jest konieczne w celu przeprowadzenia prawidłowej interpretacji wyników badań otrzymanych piezoelektryczną metodą pomiarową.

Przeprowadzone badania własne [1, 3, 4, 5] pozwoliły na poznanie procesu narostu ciśnienia obwodowego. Teoretyczny przebieg ciśnienia  $p(t)$  w pompie zębatej w czasie jednego pełnego obrotu koła zębatego ( $2\pi$ ) przedstawiono na rys. 6. Wy różnić możemy na nim cztery charakterystyczne obszary:

- obszar ssawny:  $\varphi_1 \quad p(t) = p_s$
- obszar wzrostu ciśnienia:  $\varphi_2 \quad p_s < p(t) < p_t$
- obszar stałego ciśnienia:  $\varphi_3 \quad p(t) = p_t$
- obszar zmiany ciśnienia w przestrzeni zasklepionej:  $\varphi_4 \quad p(t) = p_z = p_t + \Delta p_z$



Rys. 5. Przebieg sygnału pomiarowego z uwzględnieniem oraz z pominięciem efektu upływu ładunku [5]

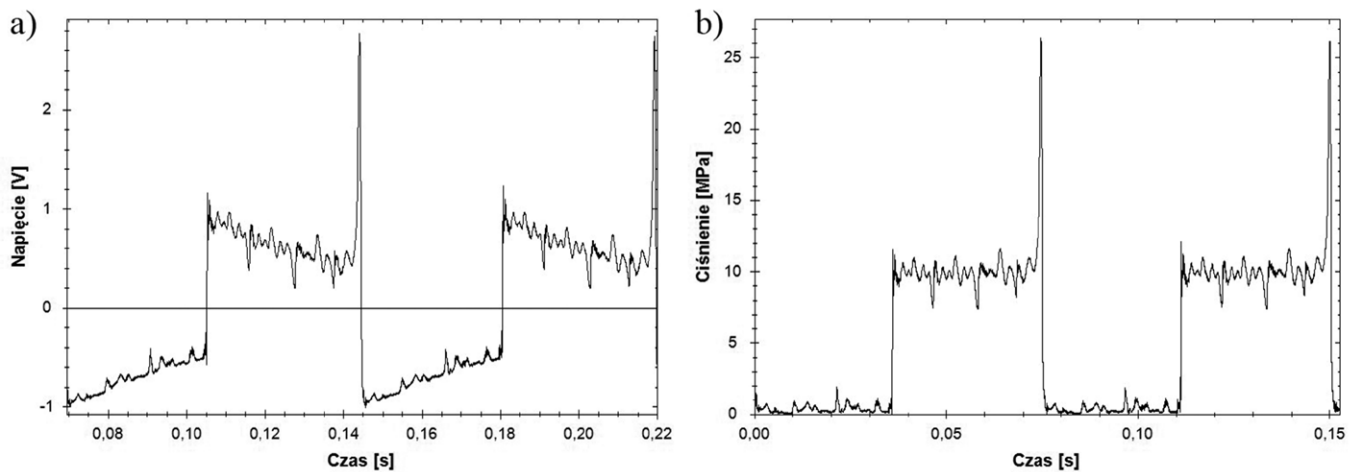


Rys. 6. Teoretyczny przebieg ciśnienia w pompie zębatej podczas pełnego obrotu koła zębatego [5]

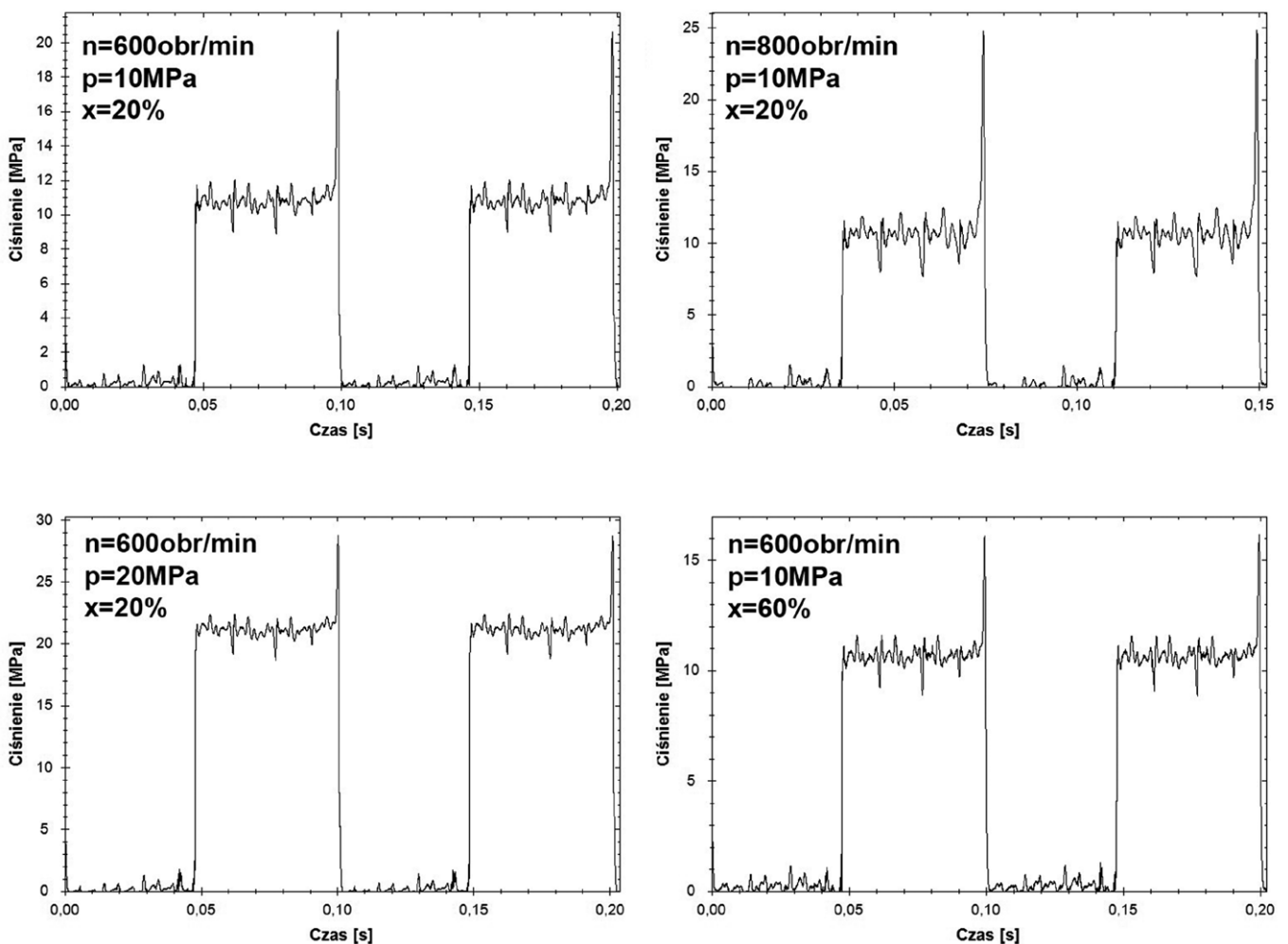
W kolejnym etapie opracowane wyniki umożliwiły określenie zależności zmian narostu ciśnienia obwodowego od parametrów geometrycznych szczeliny obwodowej występującej pomiędzy wierzchołkiem zębów a korpusem pompy [5]. Dodatkowo tego typu badania pozwalają na sprawdzenie poprawności odciążenia przestrzeni zasklepionej [1, 2, 4, 6].

### Skoki ciśnienia w komorach pompy wielotłoczkowej z rozrządem krzywkowym

Program Piezokorektor został opracowany na podstawie programu Press-kor stworzonego na Politechnice Gdańskiej na potrzeby badań pomp wielotłoczkowych z rozrządem krzywkowym PWK [7, 8]. Program ten jest nadal rozwijany i umożliwia korektę przebiegów zmian ciśnienia w komorach roboczych pomp tłoczkowych zarejestrowanych przy wykorzystaniu czujników piezoelektrycznych. Zasada działania programu jest identyczna jak Piezokorektora, przy czym może on być w pełni automatyczny. Nie wymaga od użytkownika wskazywania



Rys. 7. Porównanie przykładowego przebiegu zmian ciśnienia z przebiegiem zarejestrowanym przy pomocy czujnika piezoelektrycznego: a) przebieg zarejestrowany; b) przebieg skorygowany (przebieg zarejestrowano przy prędkości obrotowej  $n = 800$  obr./min, ciśnieniu tłoczenia  $p = 10$  MPa i nastawie wydajności 20%)



Rys. 8. Przykładowe przebiegi zmian ciśnienia dla różnych parametrów eksploatacyjnych ( $n$  – prędkość obrotowa;  $p$  – ciśnienie tłoczenia;  $x$  – nastawa wydajności pompy)

punktów charakterystycznych, ale sam je wyszukuje na podstawie cech przebiegu.

Zmiany ciśnienia w komorze idealnej pompy tłoczkowej przedstawiałby niebieski przebieg na rys. 2. Niestety w badanej pompie występowały bardzo wysokie wartości ciśnienia szczytowego w trakcie przejścia między fazami tłoczenia i ssania. Charakterystyka rys. 7 a) przedstawia przebieg zarejestrowany przy wykorzystaniu czujnika piezoelektrycznego. Przebieg ten jest zależnością napięcia od czasu. Natomiast charakterystyka b) przedstawia przebieg skorygowany i przeliczony z uwzględnieniem czułości przetwornika za pomocą programu Press-kor. Dodatkowo program automatycznie koryguje przebiegi, aby zawsze rozpoczynały się na początku fazy ssania, co poprawia czytelność i znacząco ułatwia interpretację wyników.

Program Press-kor był wykorzystywany do korygowania wyników badań wykonywanych przy różnych parametrach eksploatacyjnych. Zmieniano ciśnienie tłoczenia, prędkość obrotową oraz nastawę wydajności. Przykładowe wyniki dla pompy PWK przedstawiono na rys. 8. Widać na nich, że zmiana parametrów eksploatacyjnych wpływa na wartość rejestrowanego skoku ciśnienia szczytowego, ale także na wartość wahań ciśnienia podczas fazy tłoczenia. Problem ten był największą przeszkodą w trakcie programowania, ponieważ znacząco utrudniał automatyczne działanie programu, szczególnie gdy ciśnienia szczytowe były niskie i tylko nieznacznie odróżniały się od wahań ciśnienia, a także gdy wartość ciśnienia tłoczenia była na tyle niewielka, że wartość wahań ciśnienia zmieniała znak na ujemny. Jednakże zaimplementowane rozwiązania pozwoliły ominąć tę przeszkodę i program w większości przypadków działa automatycznie.

Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu parametrów eksploatacyjnych na wartość ciśnienia szczytowego w komorach pompy PWK, a następnie dobranie parametrów konstrukcyjnych komory kompensacyjnej [9]. Dzięki temu rozwiązaniu znacząco obniżono wartość ciśnienia szczytowego, zachowując bardzo wysoką wartość sprawności objętościowej.

### Podsumowanie


Program Piezokorektor jak i Presskor, wykorzystują tę samą zasadę działania, redukując wpływ „wycieku” ładunku elektrycznego na wynik pomiaru. Wykazały dużą przydatność przy badaniu pomp zębatych i tłoczkowych, a ich zastosowanie może być poszerzone o badania innych rodzajów maszyn wyporowych oraz zaworów, przy wykorzystaniu czujników piezoelektrycznych. Należy mieć jednak na uwadze, że nie są to aplikacje uniwersalne, duża zmienność kształtu przebiegów ciśnienia w różnych urządzeniach wymagałaby dostosowania programu do badanego urządzenia. Istniałaby możliwość napisania uniwersalnej aplikacji umożliwiającej użytkownikowi korektę pomiaru dla dowolnego badania, ale wtedy program korygujący utraciłby swoją prostotę obsługi. Wymagałby od użytkownika dokładnej znajomości badanego zjawiska, a przede wszystkim korekta jednego przebiegu zajmowałaby nie kilka sekund, jak w przypadku ww. programów, a kilka minut, co często dla prowadzącego badania ma kluczowe znaczenie.

Niemniej jednak oczekuje się, że parametry nieosiągalne dla czujników innych niż piezoelektryczne oraz taniejąca technologia tworzenia monokryształów kwarcu spowodują, że spektrum zastosowań czujników piezoelektrycznych będzie coraz szersze i co za tym idzie – również oprogramowanie korygujące będzie dalej rozwijane i coraz bardziej uniwersalne.

### Literatura

- [1] KOLLEK W., OSIŃSKI P.: *Modelling and design of gear pumps*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
- [2] KOLLEK W.: *Pompy zębate konstrukcja i eksploatacja*. Zakład Narodowy Imienia Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław 1996.
- [3] OSIŃSKI P.: *Badania hydrauliczne wysokosprawnościowych pomp zębatych o zazębieniu zewnętrznym*. XXVI Konferencja Naukowa: Problemy rozwoju maszyn roboczych, Zakopane 2008.
- [4] OSIŃSKI P.: *Modelling and design of gear pumps with modified tooth profile*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2014.
- [5] OSIŃSKI P.: *Wysokociśnieniowe i niskopulsacyjne pompy zębate o zazębieniu zewnętrznym*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [6] STRYCZEK S.: *Napęd hydrostatyczny. T. 1. Elementy*. WNT, Warszawa 1990.
- [7] OSIECKI A., OSIECKI L.: *Hydrostatic axial piston machine*. Patent europejski nr 0742870.
- [8] OSIECKI L.: *Mechanizmy rozrządu hydraulicznych maszyn wielotłoczkowych osiowych*. Monografie 72, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2006.
- [9] OSIECKI L., PATROSZ P., ZAWISTOWSKI T., LANDVOGT B., PIECHNA J., ŻYLIŃSKI B.: *Compensation of pressure peaks in PWK-type hydraulic pumps*. Key Engineering Materials. Vol. 490/2012, p. 33–44.

\* Właścicielem autorskich praw majątkowych do oprogramowania jest Politechnika Wroclawska. Kod źródłowy został opracowany i napisany na Politechnice Gdańskiej wg założeń określonych przez Politechnikę Wroclawską na potrzeby realizowanego projektu badawczego nr N N502 147938.

 dr hab. inż. Piotr Osiński – Kierownik Laboratorium; Laboratorium Napędów Hydraulicznych i Wibroakustyki Maszyn; Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych; Politechnika Wroclawska, [www.lhiw.pwr.edu.pl](http://www.lhiw.pwr.edu.pl)

mgr inż. Piotr Patrosz – Pracownik dydaktyczno-naukowy, asystent; Katedra Mechaniki i Mechatroniki; Zespół Hydrauliki i Pneumatyki; Politechnika Gdańska

artykuł recenzowany