



## Nowa koncepcja zespołu pompowego kondensatu w elektrowniach dużej mocy

Egor Kolpakov<sup>1,2</sup>, Przemysław Szulc<sup>1</sup>, Gennadij Morgunov<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> Politechnika Wroclawska

Wydział Mechaniczno-Energetyczny,

Zakład Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych

<sup>2)</sup> Moskiewski Instytut Energetyczny – Narodowy Uniwersytet Badawczy, Rosja

Wydział Energetyki Wodnej i Odnawialnych Źródeł Energii,

Zakład Hydromechaniki i Maszyn Hydraulicznych

E-mail: egor.kolpakov@pwr.edu.pl

REKOMENDACJA: dr hab. inż. Janusz Skrzypacz, prof. uczelni, PWr

### STRESZCZENIE

W artykule poruszono istotny problem pracy pompy kondensatu (PK) w elektrowni cieplnej. Zwiększające się moce bloków determinują parametry pracy pomp PK, co stawia przed konstruktorami nowe wyzwania, związane z zapewnieniem wymaganej odporności kawitacyjnej. Niniejszy artykuł dotyczy poprawy własności antykawitacyjnych pompy PK poprzez zastosowanie zespołu pompowego kondensatu ZPK i specjalnej konstrukcji wirnika pomp pierwszego i drugiego stopnia tegoż zespołu. Szczegółowo omówiono proponowaną konstrukcję oraz zaproponowano zmiany w pierwotnym rozwiązaniu opracowanym w Zakładzie Hydromechaniki i Maszyn Hydraulicznych (Moskiewski Instytut Energetyczny – Narodowy Uniwersytet Badawczy).

**SŁOWA KLUCZOWE:** pompa kondensatu, zespół pompy kondensatu, kawitacja

---

### 1. WPROWADZENIE

Rozwój społeczeństwa oraz ciągły postęp techniczny powoduje wzrost zużycia energii elektrycznej na świecie, której głównym źródłem są elektrownie ciepłe oraz jądrowe. Aby zapewnić dostawy energii na odpowiednim poziomie, moce bloków ciągle wzrastają. Obecnie standardem stają się bloki gigawatowe.

Wzrost mocy elektrowni konwencjonalnych doprowadził do znacznego wzrostu mocy pomp w nich zainstalowanych oraz wymusił spełnienie rygorystycznych parametrów pracy, w tym odporności kawitacyjnej. Dotyczy to zarówno pomp zasilających, jak i kondensatu oraz innych pracujących w obiegach elektrowni, które to pompy globalnie zużywają około 7–12% energii produkowanej przez blok [1]. Zatem poprawa efektywności energetycznej podczas wytwarzania energii elektrycznej może być zrealizowana poprzez podwyższenie sprawności pomp zainstalowanych w obiektach energetycznych, np. poprzez intensyfikację wydajności. Obecnie poziom techniki powoduje, że kwestia wzrostu wydajności elektrowni ciepłej jest trudna w realizacji. Najczęściej można to osiągnąć poprzez:

- zwiększenie sprawności procesu spalania paliwa,
- zwiększenie temperatury pary,
- zwiększenie masowego przepływu pary,
- obniżenie parametrów końcowych pary,
- optymalizację układu regeneracji,
- wykorzystanie ciepła odpadowego.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki prac koncepcyjnych nad pompami kondensatu (PK) o konstrukcji dwuczłonowej. Każdy człon pracuje z inną prędkością obrotową. Nowością jest zastosowanie wirników polirzędowych. Pompy mogą znaleźć zastosowanie w elektrowniach ciepłych, gdzie masa pary przepływającej w obiegu Clausiusa–Rankina wzrasta. Jest to możliwe m.in. dzięki zastosowaniu specjalnej konstrukcji zespołu pompy kondensatu o dużej odporności kawitacyjnej i zwiększonej żywotności. Przedstawione w artykule konstrukcje mają być zastosowane w elektrowniach klasy gigawatowej, które w przyszłości planuje zaprojektować i zbudować rosyjski koncern Rosatom.

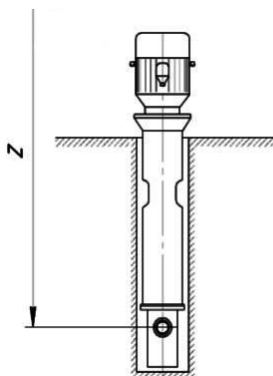
## 2. SPOSOBY POPRAWY WŁAŚCIWOŚCI ANTYKAWITACYJNYCH POMP

Ponieważ kondensat ma temperaturę około 25–35°C, a ciśnienie w skraplaczu jest bliskie próżni, pompy kondensatu są narażone na pracę w obszarze kawitacji. Dlatego, aby zapewnić ich długie i niezawodne działanie, muszą się charakteryzować wysoką odpornością kawitacyjną, którą można osiągnąć stosując następujące rozwiązania konstrukcyjne:

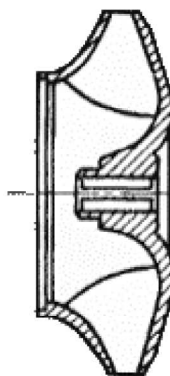
- praca z napływem – rys. 1,
- wirnik o powiększonym przekroju wlotowym – rys. 2,
- wirnik wstępny (przedwirnik) – rys. 3,
- wstępny wirnik osiowy z bardzo wysoką zdolnością ssania (stopień osiowo-wirowy) – rys. 4,
- pompa dwuwałowa kondensatu – rys. 5,
- pompa firmy Sulzer, która łączy PK1 i PK2 na jednym wale – rys. 6.

Wszystkie przedstawione rozwiązania konstrukcyjne powodują zwiększenie ciśnienia w części wlotowej wirnika pierwszego stopnia poprzez:

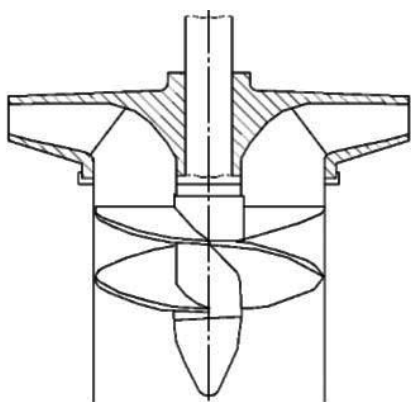
- wzrost ciśnienia hydrostatycznego,
- efekt oddziaływania wirnika wstępnego,
- ograniczenie prędkości cieczy (podział strumienia, szerszy wlot, zmniejszenie prędkości obrotowej).



**Rys. 1:** Praca z napływem [3]



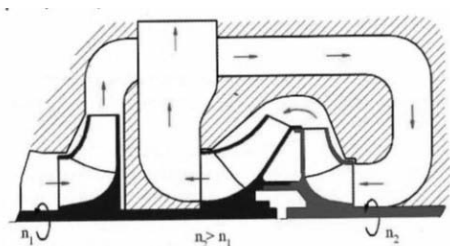
**Rys. 2:** Wirnik o powiększonym przekroju wlotowym [3]



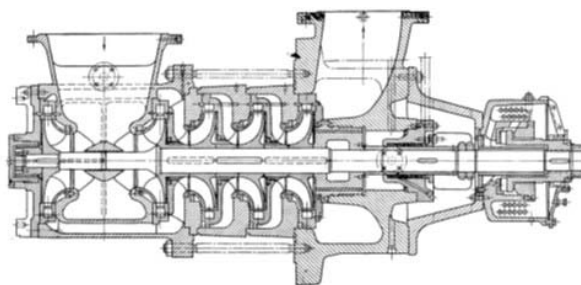
**Rys. 3:** Wirnik wstępny (przedwirnik) [3]



**Rys. 4:** Wstępny wirnik osiowy z bardzo wysoką zdolnością ssania (stopień osiowo-wirowy) [4]



**Rys. 5:** Pompa dwuwałowa kondensatu [3]

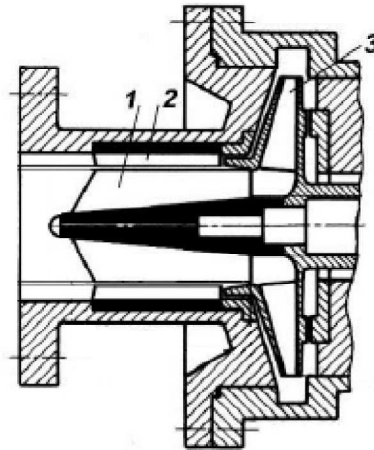


**Rys. 6:** Pompa kondensatu z dwustrumieniowym pierwszym stopniem [3]

Rozwiązanie konstrukcyjne pokazane na rys. 1 wymaga zastosowania wydłużonego wału, co powoduje pewne problemy eksploatacyjne związane ze stabilnością, objawiającą się nadmiernymi drganiami zespołu wirującego.

Wadą rozwiązania konstrukcyjnego przedstawionego na rys. 2 jest wzrost strat hydraulicznych spowodowany obecnością struktur wirowych, tworzących się w wyniku niestabilnego ruchu wirowego płynu w obszarze wlotowym wirnika. W odniesieniu do wirników o konstrukcji klasycznej konstrukcje z poszerzonym wlotem mają znacznie niższą sprawność ze względu na występowanie zwiększonych strat hydraulicznych. Wzrost odporności kawitacyjnej pierwszego stopnia pompy kondensatu możliwy jest

również poprzez zastosowanie wirnika wstępnego, przedstawionego na rys. 3. Wadą takiego rozwiązania jest konieczność częstej wymiany przedwirników. Dalszym rozwinięciem konstrukcji przedwirników jest stopień osiowo-wirowy (rys. 4). Składa się on z: wirnika wstępnego ze zmiennym skokiem łopatek, nieruchomej tulei, wirnika zasadniczego. Przekrój takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 7. Skomplikowana konstrukcja prowadzi do zwiększenia kosztów serwisowych.



**Rys. 7:** Stopień osiowo-wirowy: 1 – wirnik wstępny ze zmiennym skokiem łopatek, 2 – nieruchoma, ułopatkowana tuleja, wirnik zasadniczy, 3 – wirnik odśrodkowy [4]

Dwuwałowa konstrukcja pompy kondensatu, przedstawiona na rys. 5, składa się z dwóch części: wstępnej, o zmniejszonej prędkości obrotowej, oraz zasadniczej, szybkoobrotowej. Taka konstrukcja umożliwia poprawę odporności kawitacyjnej pompy, jednak znacznie komplikuje jej konstrukcję [3].

Inną metodą ograniczenia kawitacji w PK jest podział strumienia wlotowego, poprzez zastosowanie dwustrumieniowego wirnika pierwszego stopnia (rys. 6). Badania pokazują, że takie rozwiązanie jest korzystne z energetycznego punktu widzenia, a zjawisko kawitacji jest ograniczone do minimum.

Dotychczasowe rozwiązania pomp kondensatu, w postaci jednostek wielostopniowych, wymagają zastosowania elementu odciążającego siły osiowe. Realizowane jest to poprzez zastosowanie tarcz, tłokotarcz lub bębnow odciążających. Podczas pracy może dochodzić do sytuacji odparowania cieczy w części niskiego ciśnienia komory odciążenia, co prowadzi do kontaktu powierzchni tarczy z przeciwtarczą i uszkodzenia tych elementów [2].

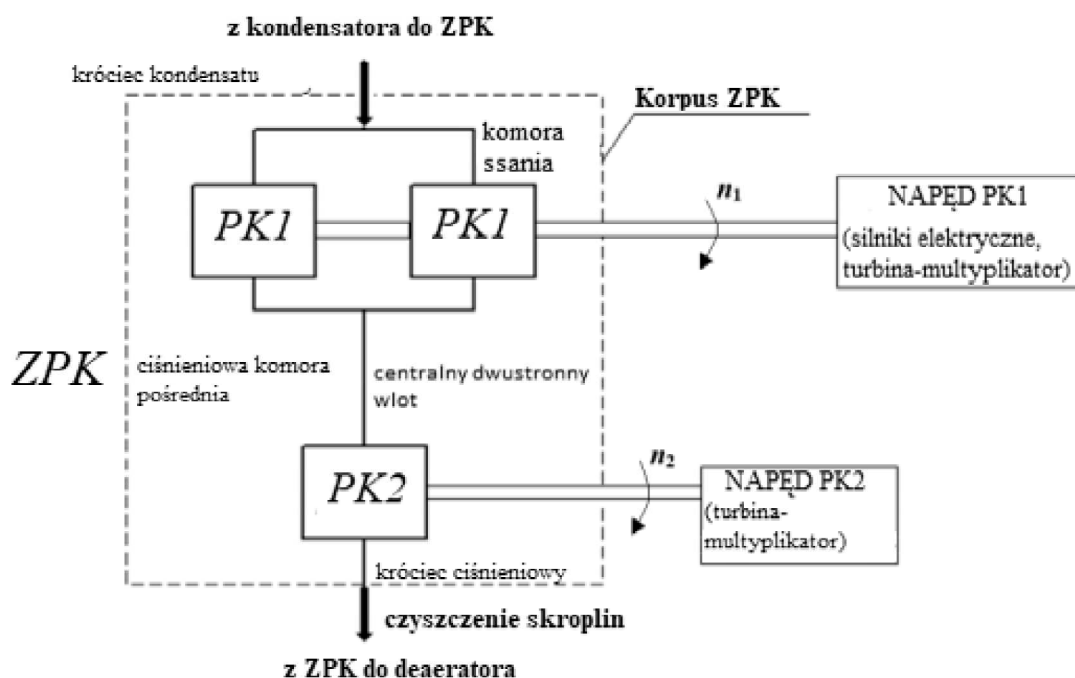
Alternatywą do zaprezentowanych powyżej rozwiązań jest opracowana w Zakładzie Hydromechaniki i Maszyn Hydraulicznych (Moskiewski Instytut Energetyczny) dwustopniowa konstrukcja o różnej prędkości obrotowej obu części nosząca nazwę zespołu pompy kondensatu ZPK.

### 3. ZESPÓŁ POMPY KONDENSATU

Przedstawione w rozdziale drugim wady dotychczas stosowanych konstrukcji wymagały opracowanie nowego rozwiązania technicznego pompy kondensatu. Proponowaną konstrukcję przedstawiono w sposób blokowy na rys. 8. Energia hydrauliczna zwiększana jest dwustopniowo w częściach PK1 i PK2 zespołu pompy kondensatu.

Część PK1 stanowi równoległe połączenie dwóch pomp. Pompy pierwszego i drugiego stopnia mają różne prędkości obrotowe, przy czym dla stopnia pierwszego wartości prędkości obrotowej są niższe niż dla drugiego. Ponadto, pompy PK1 mają bardzo wysokie właściwości antykawitacyjne, a pompa PK2 charakteryzuje się wysoką sprawnością. W proponowanym rozwiązaniu, jako pompy pierwszego stopnia zastosowano jednostki z polirzędowymi wirnikami. Zalety takiego rozwiązania to:

- możliwość uzyskania niskich wartości NPSHr dzięki zastosowaniu dwóch polirzędowych wirników pierwszego stopnia,
- brak konieczności stosowania dużych wartości wysokości napływu po stronie ssania, wyższe posadowienie pompy,
- możliwość budowy pompy o bardzo dużych mocach, wynikających z ilości produkowanej pary,
- ze względu na kompaktowość rozwiązania, dogodniejszy sposób prowadzenia prac serwisowych i remontów.



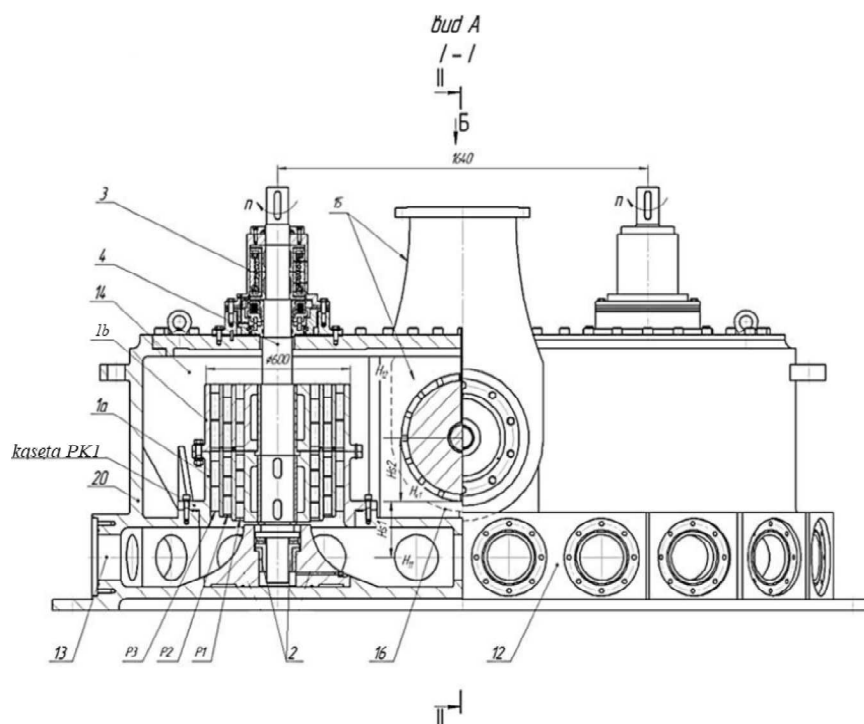
Rys. 8: Schemat zespołu pompy kondensatu

Projekt zespołu pompy kondensatu (ZPK) ilustrują rys. 9–11. Proponowana konstrukcja składa się z obudowy zewnętrznej, z hermetycznie zamkniętymi komorami ssawnymi i ciśnieniowymi, pompami kondensatu pierwszego stopnia PK1 oraz drugiego PK2, w których zastosowano wirniki polirzędowe. Przykład konstrukcji takiego wirnika przedstawiono na rys. 9. Kondensat jest podawany do jednostki przez króciec kondensatu (13) skąd przepływa do wirników polirzędowych pierwszego stopnia (1a, b), które obracają się z prędkością  $n = 1000$  obr/min. Kolejno przez łopatkową kierownicę promieniowo-osiową pompowana ciecz przepływa do pompy zasadniczej PK2.

W omawianym rozwiązaniu konstrukcyjnym pompa stopnia drugiego jest również pompą z wirnikiem polirzędowym. Ciecz, zwiększając swoją energię hydrauliczną w elementach roboczych pompy PK2 (5a, 5b), kierowana jest za pomocą kierownicy wylotowej (10) do króćców tłocznych (17).



Rys. 9: Przykład wirnika polirzędowego: model 3D oraz obiekt rzeczywisty [3]

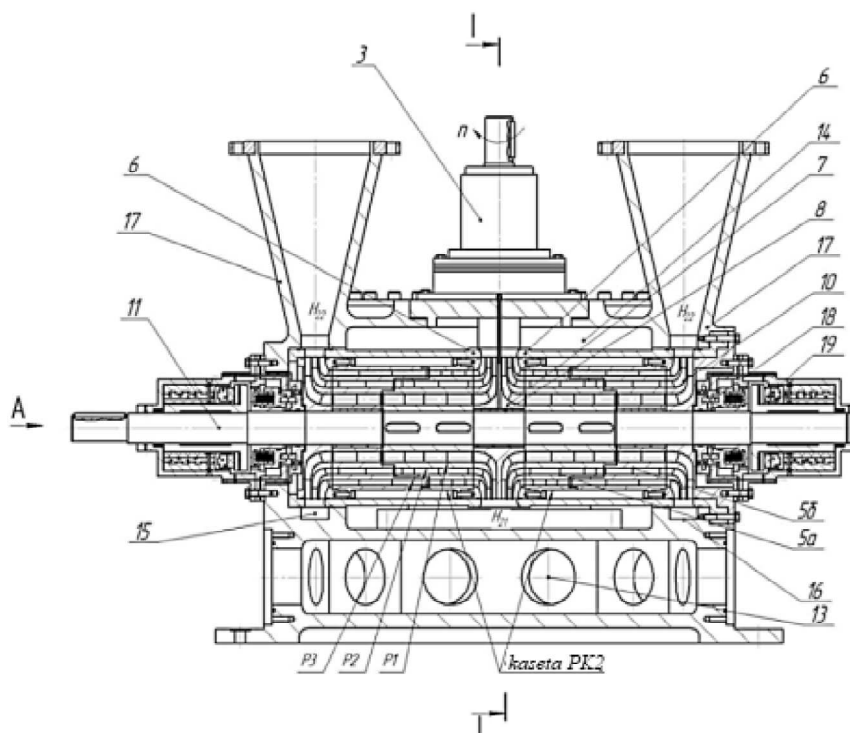


Rys. 10: Przekrój ZPK od strony wału napędowego PK2: 1a – polirzędowy wirnik pierwszego stopnia, 1b – ułatkowana tuleja pierwszego stopnia, 2 – łożysko wzdłużne, 3 – górna obudowa łożyska promieniowego PK1, 4 – wał PK1, 12 – komora ssawna, 13 – okna wlotowe kondensatu, 14 – komora międzystopniowa, 16 – półokrągły wylot, 20 – korpus [7]

Proponowana konstrukcja posiada kilka unikatowych cech:

- obudowa zewnętrzna i wszystkie zamknięte w niej pompy, kanały przepływowe, a także inne elementy są centralnie symetryczne względem osi pionowej (rys. 10),
- komora ssąca, której dno znajduje się poniżej skraplacza, ma króćce kondensatu wykonane w ścianach bocznych (rys. 10),
- w komorze wstępnej umieszczone są dwie identyczne pionowe trójstopniowe wolnoobrotowe, niskociśnieniowe pompy pierwszego stopnia PK1, zasysające ciecz z komory ssawnej, do której spływa grawitacyjnie kondensat poprzez króćce wlotowe,
- w części zasadniczej umieszczona jest szybkoobrotowa, dwustrumieniowa pompa wysokiego ciśnienia z wirnikiem polirzędowym. PK2 jest zasilana poprzez symetryczny kanał promieniowo-osiowy,

- ciecz opuszcza polirzędowe wirniki pompy PK2 przez osiowo-promieniowe kierownice i przepływa do dwóch króćców tłocznych.



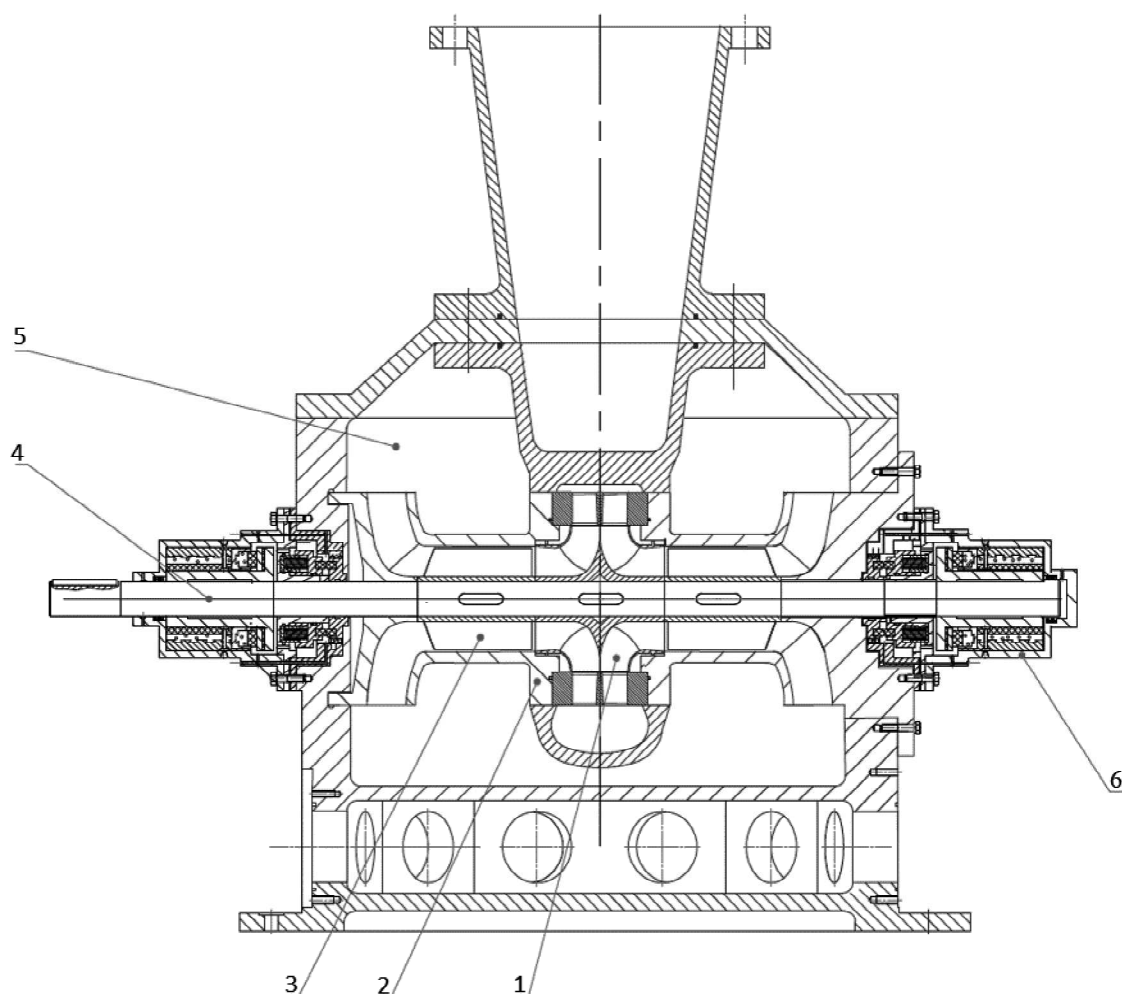
**Rys. 11:** Przekrój ZPK od strony wału napędowego PK2: 3 – PK1, 5a – polirzędowy wirnik drugiego stopnia, 5b – ułotkowana tuleja stopnia drugiego, 6 – korpus zewnętrzny, 7 – promieniowo-osiowy kanał wlotowy, 8 – centralne łożysko promieniowe PK2, 9 – kanał smarowania łożyska, 10 – kierownice wylotowe, 11 – wał PK2, 13 – okna wlotowe kondensatu, 15 – komora wysokiego ciśnienia, 17 – króćce tłoczny, 18 – uszczelnienie, 19 – łożysko osiowo-promieniowe [7]

#### 4. ALTERNATYWNA KONSTRUKCJA ZESPOŁU POMPY KONDENSATU

W związku z tym, że konstrukcja zespołu pompy kondensatu, przedstawiona powyżej jest dosyć skomplikowana, a niektóre elementy są drogie w wytworzeniu, w zespole prof. Morgunova została opracowana alternatywna wersja zespołu pompy kondensatu, przedstawiona na rys. 12.

Zasadnicza różnica w proponowanej konstrukcji dotyczy rozwiązania pompy PK2. W przeciwieństwie do rozwiązania bazowego, wirniki polirzędowe zamieniono na klasyczny wirnik odśrodkowy, dwustrumieniowy współpracujący z wirnikiem wstępnym. Prędkość obrotowa PK2 to  $n = 3000$  obr/min. Z pompy kondensatu pierwszego stopnia ciecz przepływa do komory międzystopniowej (rys. 12) i dalej kierowana jest przez kanał zasilający do wirnika wstępnego (rys. 12) pompy drugiego stopnia PK2.

Kolejno energia hydrauliczna zwiększana jest w wirniku pompy dwustrumieniowej (rys. 12). Po opuszczeniu wirnika kondensat przepływa do kierownicy wylotowej, w której następuje konwersja energii kinetycznej w energię potencjalną, a następnie spiralnym kanałem zbiorczym opuszcza pompę.



**Rys. 12:** Alternatywna konstrukcja zespołu pompy kondensatu, przekrój od strony wału napędowego PK2:  
 1 – dwustrumieniowy wirnik pompy PK2; 2 - kanały doprowadzające; 3 – wirnik wstępny; 4 – wał PK2;  
 5 – promieniowo-osiowa komora międzystopniowa; 6 – łożyska promieniowo-osiowe [8]

Proponowana konstrukcja charakteryzuje się:

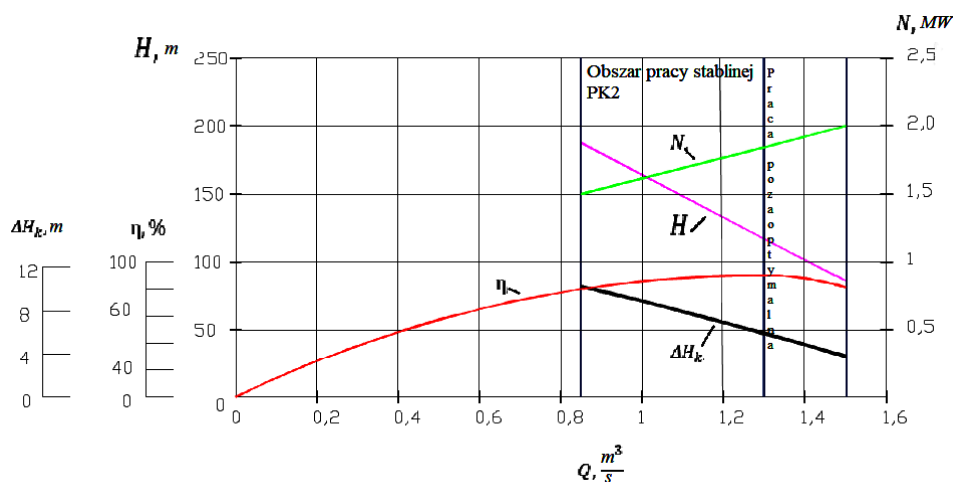
- mniejszym stopniem skomplikowania w odniesieniu do konstrukcji bazowej,
- jednym króćcem tłocznym,
- kompaktowością,
- mniejszymi kosztami wytworzenia,
- łatwiejszą eksploatacją,
- wszystkie elementy tworzące pompę kondensatu drugiego stopnia można zdemonstrować bez konieczności rozbierania całej jednostki. Demontaż jest wykonywany od prawej strony do lewej (rys. 12).

Wstępna analiza numeryczna wykonana przy użyciu autorskich programów do symulacji pracy pomp: VISC i PTNCL (opracowanych w Zakładzie Hydromechaniki i Maszyn Hydraulicznych Moskiewskiego Uniwersytetu Energetycznego) wykazała celowość takiego rozwiązania. Opracowana poprzez dr inż. E.A. Ryabtseva konstrukcja pierwszego stopnia wykazała dobre własności anytkawitacyjne, co jest ważne dla pomp pracujących z cieczami o wysokiej temperaturze [3]. Charakterystyki teoretyczne opracowano na podstawie wyników obliczeń przy użyciu oprogramowania PTNCL.

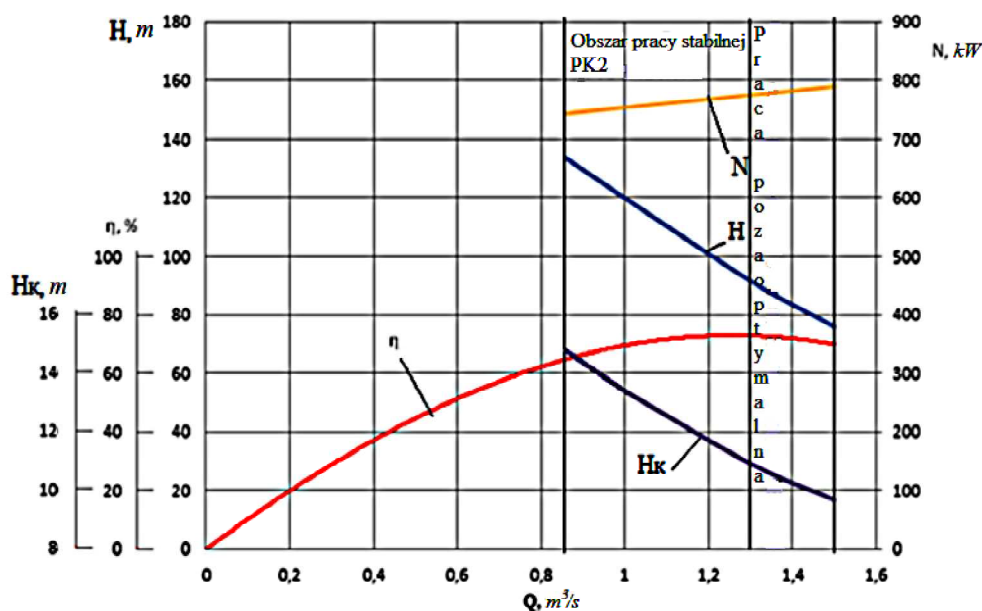
Na rysunku 13 przedstawiono charakterystyki pompy PK2 po zaproponowanych zmianach konstrukcyjnych, natomiast na rys. 14 charakterystyki pompy bazowej. Ana-



lizując powyższe wykresy, można stwierdzić, że zaproponowana konstrukcja charakteryzuje się wyższą sprawnością, wysokością podnoszenia oraz lepszymi parametrami antykawitacyjnymi (niższa wartość NPSHr).



Rys. 13: Charakterystyka teoretyczna PK2 (wersja alternatywna) [8]



Rys. 14: Charakterystyka teoretyczna PK2 (wersja bazowa) [8]

## 5. WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki prac koncepcyjnych pomp kondensatu, które mogą znaleźć zastosowanie w nowych elektrowniach ciepłych o mocy bloków powyżej 1 GW. Wstępne obliczenia parametrów pracy wykazują przewagę rozwiązania alternatywnego, jednak w chwili obecnej ciągle trwają prace projektowo-optymalizacyjne, mające na celu zbudowanie działających prototypów zarówno w wersji bazowej, jak i alternatywnej. Dopiero wyniki badań doświadczalnych pozwolą podjąć racjonalną decyzję o kierunkach dalszych prac rozwojowych w zaprezentowanym temacie.

**LITERATURA**

- [1] Michailov A.K., Malyshenko V.V., *Energeticheskie nasosy: Spravochnoe posobie*, M.: Energoizdat, 1981.
- [2] Shil J., *Tendencii razvitiya pitatelnykh nasosov*, Vestnik Juzno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta, nom. 1(41), 2005.
- [3] Ryabcev E.A., *Sozdanie i issledovanie poliryadnogo kondensatnogo nasosa pervogo podjoma s multiplannymi rabochimi organami*, praca doktorska, 2018.
- [4] Anikunidov A.A., Panaiotti S.S., Timushev S.F., *Predvključennoe ustrojstvo so sverchvysokoj vsasyvajuščej sposobnost'ju i nizkim urovnem nizkočastotnykh pulsacij*, Inženerny vestnik, 29–38, 2015.
- [5] Morgunov G.M., *Sovershenstvovanie nasosov novogo oborudovanija v moshchnyh teploenergetičeskikh ustanovkach*, Teploenergetika, **12**, 45–53, 2010.
- [6] Morgunov G.M., *Razrabotka nasosov novogo pokolenija pitatelnoj sistemy moščnykh energoblokov*, Teploenergetika, **2**, 42–53, 2013.
- [7] Morgunov G.M., Ryabcev E.A., Kachan J.I., *Konstrukcii i vidy ispolnenija kondensatnogo nasosa vtorogo podjoma dla energoblokov gigavattnogo klassa*, Nasosy i oborudovanie, **1–2**, 65–67, 2016.
- [8] Kolpakov E.A., *Piervyje etapy proektirovanija i rasčtynogo issledovanija D centrobežnogo nasosa vtorogo podjoma dla agregata kondensatnykh nagnetatelej energoustanovok gigavattnogo klassa*, praca magisterska, 2016.