

**Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych  
(w języku polskim)**

**Dmytro Samoilenko**

Warszawa 2019

## Spis treści

<b>1. Imię i nazwisko</b> .....	3
<b>2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe - z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej i nazwisk osób, które pełniły funkcje promotora i recenzentów</b> .....	3
<b>3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.</b> ....	3
<b>4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):</b> .....	4
4.1. Cele pracy .....	4
4.2. Opis sposobu osiągnięcia celu pracy .....	5
4.2.1. Zasady projektowania dośrodkowych turbin z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. ....	6
4.2.2. Badania empiryczne z wykorzystaniem widlastego turbodoładowanego silnika o zapłonie samoczynnym, wyposażonego w zespół turbodoładowania o stałej geometrii oraz w nowy prototyp turbosprężarki o zmiennych parametrach geometrycznych .....	9
4.2.3. Opracowanie metody analizy zjawisk przepływowych w sterowanej dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. ....	15
4.2.4. Matematyczne modelowanie zjawisk przepływowych w sterowanej dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych .....	18
4.2.5. Analiza energo-egzergetyczna turbodoładowanego silnika wyposażonego w dośrodkową turbinę z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych .....	20
4.3 Podsumowanie oraz omówienie osiągniętych celów.....	22
4.4. Wkład autora w rozwój dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn.....	23
<b>5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych</b> .....	26
5.1. Charakterystyka dorobku naukowego publikacyjnego.....	26
5.2. Zestawienie dorobku naukowego:.....	34
5.3. Udział w projektach badawczych.....	35
5.4. Nagrody za działalność naukową:.....	36

## 1. Imię i nazwisko

**Dmytro Samoilenko**

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe - z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej i nazwisk osób, które pełniły funkcje promotora i recenzentów

- a) Magister inżynier, dyplom z wyróżnieniem ze specjalności silniki spalinowe, Narodowy Uniwersytet Techniczny „Charkowski Instytut Politechniczny” (Ukraina), 2002 rok;
- b) Kandydat nauk technicznych ze specjalności silniki oraz instalacje energetyczne, Narodowy Uniwersytet Techniczny „Charkowski Instytut Politechniczny” (Ukraina), 2008 rok. Tytuł rozprawy (w tłumaczeniu na język polski):

*Poprawa techniczno-ekonomicznych charakterystyk silników przeznaczonych do samochodów i ciągników poprzez sterowanie turbodoładowaniem*

*Promotor: Prof. dr hab. inż. Andrii Marchenko*

*Recenzenci: Prof. dr hab. inż. Stanislav Eroshenkov, dr inż. Leonid Moshencev*

Rada Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej uchwalała z dnia 24 maja 2017 roku uznała wyżej wymieniony stopień naukowy kandydata nauk technicznych za równoważny z polskim stopniem naukowym doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn oraz upoważniła Dziekana Wydziału SiMR PW do wystawienia panu Dmytro Samoilenko stosownego zaświadczenia.

- c) starszy pracownik naukowy ze specjalności silniki oraz instalacje energetyczne (nieposiadający polskiego odpowiednika najwyższy stopień w hierarchii pracowników naukowo-badawczych na Ukrainie), Ministerstwo Edukacji i Nauki Ukrainy, 2014 rok

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

- a) Adiunkt (2015 – obecnie), Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Instytut Pojazdów, Zakład Silników Spalinowych, ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa.
- b) Starszy pracownik naukowy/docent (2008 – 2015), Narodowy Uniwersytet Techniczny „Charkowski Instytut Politechniczny”, Wydział Inżynierii Pojazdów, Zakład Silników Spalinowych, ul. Kyrpychova 2, 61002, Charków, Ukraina.
- c) Pracownik naukowy (2003 – 2008), Narodowy Uniwersytet Techniczny „Charkowski Instytut Politechniczny”, Wydział Inżynierii Pojazdów, Zakład Silników Spalinowych, ul. Kyrpychova 2, 61002, Charków, Ukraina.

**4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):**

- a) **Monografia habilitacyjna:** Samoilenko D.: *Variable geometry radial inflow turbines with vaneless volute distributor: theory, research and application*. Seria wydawnicza Prac Naukowych – Mechanika z. 272. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019. ISSN 0137-2335

Recenzenci wydawniczy: prof. dr hab. inż. Ireneusz Pielecha (Politechnika Poznańska), dr hab. inż. Marek Brzeżański, prof. uczelni (Politechnika Krakowska)

- b) omówienie celu naukowego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania:

Tytuł monografii w języku polskim:

**Dośrodkowe turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych: teoria, badania empiryczne, zastosowanie**

Praca, wydana w języku angielskim pod tytułem *Variable geometry radial inflow turbines with vaneless volute distributor: theory, research and application*, poświęcona została zagadnieniom związanym z projektowaniem, budową, eksploatacją oraz teorią dośrodkowych turbin z kierownicą bezłopatkową, sterowanych za pomocą zmiany parametrów geometrycznych na wlocie do turbiny.

**4.1. Cele pracy**

Jednym z głównych celów prowadzonych badań było opracowanie naukowych podstaw projektowania oraz badania dośrodkowych turbin z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych w oparciu o szeroki zakres badań empirycznych oraz na podstawie kompleksowej analizy teoretycznej procesów przetwarzania energii zachodzących w turbinie. Koncepcja alternatywnego sterowania turbiną dośrodkową może być zastosowana w układach turbodoładowania silników spalinowych, układach zasilania powietrzem ogniwo paliwowych oraz układach realizujących obieg Rankine'a, służących do odzysku energii spalin. Sterowanie parametrami geometrycznymi turbiny odbywa się przez zmianę pola powierzchni najmniejszego przekroju kanału dolotowego w turbinie z kierownicą bezłopatkową.

Aby cel badań został zrealizowany, należało wykonać następujące główne zadania:

1. Usystematyzować wiedzę w zakresie najważniejszych perspektywicznych zastosowań dośrodkowych turbin w budowie i eksploatacji maszyn.
2. Opracować nową koncepcję turbiny o zmiennych parametrach geometrycznych i z bezłopatkową kierownicą, która cechuje się minimalnymi stratami przepływu gazu, rozszerzonym zakresem sterowania i niezawodnością.
3. W oparciu o już posiadane przez autora doświadczenie z budowy prototypów sterowanych turbosprężarek i uzupełniając je nowymi badaniami eksperymentalnymi oraz teoretycznymi, opracować naukowe podstawy projektowania dośrodkowych turbin z kierownicą bezłopatkową, sterowanych za pomocą zmiany parametrów geometrycznych.
4. Przeprowadzić badania empiryczne nowej konstrukcji dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych, ocenić możliwości poprawy charakterystyk użytkowych silnika spalinowego, wyposażonego w sterowaną turbosprężarkę, opracować odpowiedni algorytm sterowania turbiną o zmiennych parametrach geometrycznych.
5. Na podstawie modelowania matematycznego zjawisk przepływowych w sterowanej turbinie a także w oparciu o analizę energo-egzergetyczną, opracować kompleksową metodę, służącą do oceny jakości procesów przetwarzania energii w dośrodkowych turbinach z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych.
6. Ocenić jakość procesów zachodzących w dośrodkowych turbinach z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych przy użyciu opracowanej kompleksowej metody oceny oraz odpowiadających jej modeli matematycznych.

#### ***4.2. Opis sposobu osiągnięcia celu pracy***

Najbardziej obiecującymi obszarami zastosowania dośrodkowych turbin w budowie i eksploatacji maszyn są:

- układy turbodoładowania silników spalinowych,
- układy realizujące obieg Rankine'a, najczęściej stosowane do produkcji energii elektrycznej,
- układy zasilania powietrzem ogniwo paliwowych.

Należy stwierdzić, iż stosowanie wewnętrznego sterowania przez zmianę parametrów geometrycznych turbiny zezwala na poprawę parametrów eksploatacyjnych dla wszystkich wyżej wymienionych układów przez podtrzymywanie wysokiej sprawności w pełnym zakresie stanów ich pracy.

Obecnie występują dwa główne rodzaje obudów dośrodkowych turbin stosowanych w układach turbodoładowania silników spalinowych. Są to turbiny z kierownicą łopatkową lub bezłopatkową. Główną zaletą turbin z kierownicą bezłopatkową jest niższa o 15 ÷ 20 % cena, w porównaniu do obudowy wyposażonej w łopatki. Oba rozwiązania pozwalają na wdrożenie koncepcji zmiennej geometrii. Uwzględniając światowe doświadczenia w dziedzinie projektowania współczesnych układów turbodoładowania można stwierdzić, iż sterowanie turbiną przez zmianę położenia łopatek kierownicy jest wciąż najbardziej skuteczną metodą wewnętrznego sterowania turbin, która zapewnia optymalną wartość współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  (dalej oznaczanego symbolem  $\lambda$ ) we wszystkich trybach pracy silnika: od biegu jałowego do maksymalnych obciążeń. Jednak w monografii uwaga została skupiona na alternatywnej metodzie sterowania dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą, która pierwotnie była opracowana do zastosowania w układach turbodoładowania silników spalinowych. Metoda ta została opatentowana na Ukrainie i w Rosji, a także jest chroniona w 170 państwach (patent PCT). Autor monografii jest współwłaścicielem patentów. Należy w tym miejscu podkreślić, iż alternatywna metoda z powodzeniem może być wykorzystana zarówno w ekspanderach, stosowanych w układach realizujących obieg Rankine'a, jak i w turbinach układów zasilania powietrzem ogniwo paliwowych. W porównaniu do sterowania przez zmianę położenia łopatek kierownicy, nowa koncepcja charakteryzuje się prostotą, niższym kosztem, niezawodnością oraz wystarczającym zakresem sterowania parametrów doładowania. Ponadto turbosprężarkę o niewielkich gabarytach można łatwo przerobić na sterowaną za pomocą wyżej wymienionej metody. Koncepcja przeszła wszystkie etapy naukowej implementacji: od pomysłu do dwóch rodzajów prototypów turbin o zmiennych parametrach geometrycznych - z jednym oraz z dwoma wlotami gazu do obudowy.

#### ***4.2.1. Zasady projektowania dośrodkowych turbin z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych.***

W rozdziale drugim monografii przedstawione są cechy konstrukcyjne prototypów sterowanych turbin z bezłopatkową kierownicą z jednym oraz dwoma wlotami. Zaprezentowano również statyczne charakterystyki turbin i rekomendacje odnośnie

właściwego wyboru obudowy turbiny dla instalacji mechanizmu sterowania oraz zalecenia dotyczące podniesienia niezawodności konstrukcji, jak również wymieniono ogólne wymagania dotyczące geometrii elementu wyprofilowanego (sterującego) i jego lokalizacji w obudowie turbiny. Omówione zagadnienia stanowią naukowe podstawy projektowania dośrodkowych turbin z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych.

Zatem, w oparciu o wcześniejsze doświadczenia, zdobyte na etapie sprawdzania koncepcji (Proof of Concept) w ramach którego alternatywna metoda sterowania dośrodkowych turbin z bezłopatkową kierownicą została wstępnie zweryfikowana przez przeprowadzenie badań empirycznych z wykorzystaniem czterocylindrowego rzędowego silnika o zapłonie samoczynnym (ZS), wyposażonego w prototyp turbosprężarki ze sterowaną turbiną o jednym wlocie, w trakcie których skuteczność nowej koncepcji została udowodniona w trybach pracy silnika odpowiadających testowi ESC (European Stationary Cycle), a także biorąc pod uwagę eksperymentalnie uzyskane charakterystyki statyczne sterowanej turbiny oraz zalecenia dotyczące wyboru właściwej obudowy turbiny o stałej geometrii, do której zostanie zamontowany mechanizm sterujący, została na potrzeby badań opisanych w niniejszej rozprawie opracowana nowa konstrukcja turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. Sterowany zespół turbodoładowania jest przeznaczony dla doładowania widlastych silników o zapłonie samoczynnym. Nowa konstrukcja jest oryginalnym rozwiązaniem, unikalność którego polega na tym, że specjalnie wyprofilowany element steruje turbiną przez zmianę parametrów geometrycznych na jednym z jej wlotów, obsługując jeden rząd cylindrów silnika widlastego, a ponadto obydwa elementy znajdują się na jednym dysku sterującym. W efekcie, jeden sterowany zespół turbodoładowania (a nie dwa), wyposażony w turbinę z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych, dostarcza optymalną ilość powietrza do wszystkich cylindrów silnika widlastego, co jest nowatorskim, unikalnym w skali światowej rozwiązaniem w dziedzinie dośrodkowych sterowanych turbin.

Do badań sterowania turbiny przez zmianę minimalnej wartości pola powierzchni najmniejszego przekroju kanału przyspieszenia gazu na wlocie do bezłopatkowej kierownicy wybrano seryjną turbosprężarkę o stałych parametrach geometrycznych. Miała ona obudowę z dwoma wlotami.

Dotychczasowe doświadczenia wykazały, iż w celu zapewnienia sterowania z maksymalną sprawnością (zapewnienie wysokiej sprawności turbiny w całym zakresie natężenia przepływu gazu), a także biorąc pod uwagę możliwość instalacji mechanizmu sterowania wewnątrz obudowy turbiny o stałej geometrii, element sterowania należało

wyprofilować w specjalny sposób. Specjalne wyprofilowanie elementu sterującego jest główną wyróżniającą cechą nowej konstrukcji w porównaniu z pierwszym prototypem sterowanej turbiny, stworzonym na etapie weryfikacji koncepcji. Ponadto wcześniejsze eksperymenty wykazały, że zakres ruchu tego elementu musi zapewniać maksymalną głębokość sterowania przy minimalnym przemieszczeniu kątowym elementu wyprofilowanego. Z tego punktu widzenia, obudowa turbiny z dwoma wlotami gazu jest korzystniejsza w porównaniu z konstrukcją z jednym wlotem, ponieważ przewidywalna głębokość sterowania zostanie wówczas podwojona przy takim samym przemieszczeniu kątowym elementów wyprofilowanych. Polepszo również niezawodność nowej konstrukcji. Elementy sterujące, które znajdują się w bezpośrednim kontakcie ze spalinami, były specjalnie chronione przed zablokowaniem.

Nowy prototyp sterowanej turbosprężarki został zaprojektowany przez autora na podstawie seryjnej turbosprężarki o stałych parametrach geometrycznych, w której turbina miała dwa wloty i była stosowana do doładowania widlastych silników o zapłonie samoczynnym. Prototyp przetestowano na standardowym stanowisku do badania turbosprężarek, gdzie turbinę zasilano spalinami, a charakterystykę turbiny o zmiennych parametrach geometrycznych uzyskano w szerokim zakresie natężenia przepływu gazu. Wyniki eksperymentów wykazały, że względna sprawność efektywna sterowanej turbiny zmieniała się w zakresie, który nie przekraczał  $\pm 3\%$ , podczas gdy względne natężenie przepływu gazu zmieniało się w granicach 30%. Tak niewielką zmianę sprawności turbiny można wytłumaczyć minimalnymi stratami przepływu gazu w nowej konstrukcji turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. Na podstawie tych badań empirycznych została opracowana oryginalna metodyka, która polega na uzyskiwaniu i analizie zależności względnej sprawności od względnego natężenia przepływu gazu dla stałych stopni rozprężania gazu w turbinie o zmiennej geometrii i która jest kluczową walidacją eksperymentalną, zalecaną do wykorzystania przy projektowaniu nowych konstrukcji sterowanych turbin. Ponadto, omówiona metodyka może być stosowana nie tylko do analizy turbin turbosprężarki, ale również do walidacji dośrodkowych ekspanderów w układach realizujących obieg Rankine'a lub turbin turbokompresorów, stosowanych w układach zasilania powietrzem ogniów paliwowych. W serii testów stwierdzono, iż podczas sterowania dysk z wyprofilowanymi elementami obracał się płynnie i bez zacięć, co można wytłumaczyć obecnością specjalnie zaprojektowanych otworów, służących do kompensacji różnicy ciśnień oraz zamontowaniem w obudowie turbiny opór służących do centrowania dysku, których górna część została wykonana w kształcie kuli.



„Głębokość sterowania”, lub zależność między polem powierzchni najmniejszego przekroju kanału przyspieszenia gazu na wlocie do bezłopatkowej kierownicy od względnego przemieszczenia wyprofilowanego elementu, jest bardzo ważną cechą turbiny o zmiennych parametrach geometrycznych. Dla nowego prototypu sterowanej turbiny, który został zbudowany na bazie turbosprężarki o stałej geometrii, osiągnięta głębokość sterowania wyniosła 40%. Wartość ta jest ograniczona przez możliwość zainstalowania dysku z dwoma wyprofilowanymi elementami w obudowie **seryjnej turbiny** o stałych parametrach geometrycznych, ale jak wykazały badania empiryczne, wielkość ta jest wystarczająca do znacznej poprawy wskaźników procesu roboczego silnika o zapłonie samoczynnym w różnych trybach jego pracy. Ważne jest również to, że podczas sterowania nowego prototypu turbosprężarki istnieje możliwość zwiększenia wartości najmniejszego przekroju kanału przyspieszenia gazu na wlocie do bezłopatkowej kierownicy o 12% w porównaniu do turbosprężarki seryjnej o stałych parametrach geometrycznych. Takie rozwiązanie pozwala na poprawę charakterystyki zużycia paliwa przez silnik o zapłonie samoczynnym w trybach pracy o małym obciążeniu, co jest możliwe dzięki zmniejszeniu stosunkowo wysokich, a tym samym nieoptymalnych, wartości współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  (jest to osiągane przez zmniejszenie ciśnienia doładowania).

#### ***4.2.2. Badania empiryczne z wykorzystaniem widlastego turbodoładowanego silnika o zapłonie samoczynnym, wyposażonego w zespół turbodoładowania o stałej geometrii oraz w nowy prototyp turbosprężarki o zmiennych parametrach geometrycznych***

W trzecim rozdziale monografii przedstawiono metodę empirycznego badania silnika o zapłonie samoczynnym, wyposażonego w sterowany zespół turbodoładowania oraz w turbosprężarkę o stałych parametrach geometrycznych. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych opracowano różne algorytmy sterowania prototypowymi turbinami dośrodkowymi, ukierunkowane na optymalizację wybranych eksploatacyjnych parametrów pracy silnika w stanach statycznych według charakterystyk obciążeniowych i zewnętrznej charakterystyki prędkościowej.

Badania empiryczne zostało przeprowadzone z wykorzystaniem czterosuwowego sześciocylindrowego widlastego silnika o ZS. Zależnie od celów badania, eksperymentalny silnik był wyposażony w prototyp turbosprężarki o zmiennych parametrach geometrycznych lub w seryjną turbosprężarkę o stałej geometrii. Prototyp sterowanej turbosprężarki miał turbinę z dwoma wlotami i został wyposażony w specjalny mechanizm przekładniowy, który pozwalał

na precyzyjne ustawienie wartości najmniejszego przekroju kanału przyspieszenia gazu na wlocie do bezłopatkowej kierownicy, zapewniając wymaganą głębokość sterowania. Wskaźniki procesu roboczego badanego silnika zostały zarejestrowane w punktach pracy według charakterystyki zewnętrznej i prędkościowej. Pomiarów dokonywano przy następujących prędkościach obrotowych wału korbowego: 1300, 1550, 1810 i 2100 obr/min. Zmierzone parametry zostały zaprezentowane w postaci następujących wskaźników pracy silnika i turbosprężarki: mocy użytecznej, momentu obrotowego, jednostkowego zużycia paliwa, współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ , ciśnienia doładowania, temperatury spalin na wlocie do turbiny, poziomu zadymienia spalin, a także sprawności turbiny, sprężarki i turbosprężarki. Głównym czynnikiem ograniczającym obciążenie silnika podczas badań eksperymentalnych była maksymalna dopuszczalna temperatura spalin, ograniczona do 963 K. Poziomy zadymienia spalin zostały zmierzone w laboratorium przy użyciu dymomierza AVL 4000. Badania empiryczne, przedstawione w rozdziale 3 monografii, wykazały wysoką wydajność i funkcjonalność nowego prototypu sterowanej turbosprężarki, zaprojektowanego dla widlastego silnika o ZS, który wcześniej był wyposażony w turbosprężarkę o stałej geometrii.

Silnik o zapłonie samoczynnym, wyposażony w prototyp sterowanej turbiny z dwoma wlotami, został przetestowany w trybach pracy według charakterystyki obciążeniowej, w wyniku czego uzyskano nowe wyniki. W trybach o małym obciążeniu silnika, gdy prędkości obrotowe wału korbowego odpowiadają trybom maksymalnego momentu obrotowego i są równe  $n = 1550$  lub  $1300$  obr/min, pole najmniejszego przekroju kanału przyspieszenia gazu na wlocie do bezłopatkowej kierownicy należy ustawić jako maksymalne ( $A_{max} = 2360 \text{ mm}^2$ ), powodując tym samym zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa o  $3 \div 8 \text{ g/kWh}$ . Należy dodatkowo podkreślić duże znaczenie zwiększonej efektywności paliwowej w wymienionych trybach, ponieważ ich udział w różnych cyklach badania emisji może osiągnąć nawet 60%. Wraz ze wzrostem obciążeń maleje przyrost zużycia paliwa, a gdy osiągnięta zostanie granica niewrażliwości na sterowanie turbiny, występuje odwrotny trend - redukcja pola najmniejszego przekroju kanału przyspieszenia gazu  $A$  prowadzi do zmniejszenia jednostkowego zużycia paliwa. Jednocześnie, jeśli ustawiono minimalne pole przekroju  $A_{min} = 1442 \text{ mm}^2$ , powoduje to zwiększenie ciśnienia doładowania i podnosi wartości  $\lambda$ , a w konsekwencji umożliwia osiągnięcie większych wartości maksymalnego momentu obrotowego. Co więcej, ten wzrost odbywa się bez wyraźnego pogorszenia charakterystyki zużycia paliwa.

Na podstawie wyników badań empirycznych ustalono również granicę niewrażliwości zużycia paliwa przez silnik na sterowania turbosprężarki. Jest to nowe zjawisko, odkryte w

niniejszym badaniu, które występuje w jednym z punktów charakterystyki obciążeniowej przy stałej wartości prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Granica niewrażliwości na sterowanie turbosprężarki charakteryzuje się stałymi wartościami jednostkowego zużycia paliwa, które są niezależne od położenia elementu sterującego (wyznaczającego wartości powierzchni pola przekroju  $A$ ). Granica niewrażliwości dla badanego silnika praktycznie liniowo zależy od prędkości obrotowej. Przykładowo można podać, iż występują dwa charakterystyczne punkty pracy silnika, które można zdefiniować jako punkt 270 Nm w trybie pracy według charakterystyki obciążeniowej z prędkością obrotową wału korbowego  $n = 1550$  obr/min i punkt 430 Nm dla 1300 obr/min. Punkty te charakteryzują się niewrażliwością jednostkowego zużycia paliwa na zmianę wartości  $A$ , a w konsekwencji na wartość  $\lambda$ . Podczas badań eksperymentalnych ustalono również, iż w trybie mocy nominalnej prawie nie występuje wpływ wartości  $A$  na jednostkowe zużycie paliwa. Zatem w trybach zbliżonych do trybu mocy nominalnej ( $n = 1800$  obr/min i  $n = 2100$  obr/min) zysk z zastosowania sterowanej turbiny, w porównaniu do turbosprężarki o stałej geometrii, ulega zmniejszeniu, ponieważ współczynnik  $\lambda$  i inne parametry pracy silnika są optymalne zarówno dla silnika o ZS wyposażonego w turbosprężarkę seryjną, jak i w przypadku silnika wyposażonego w turbosprężarkę o zmiennych parametrach geometrycznych. Zatem zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa nie przekroczyło 2 g / kWh dla trybu z  $n = 1800$  obr/min, natomiast dla trybu z  $n = 2100$  obr/min jednostkowe zużycie paliwa praktycznie nie ulega zmianie.

W oparciu o szeroki zakres badań empirycznych, opracowano algorytm 3-pozycyjnego sterowania turbiną o zmiennej geometrii, mający na celu osiągnięcie minimalnego jednostkowego zużycia paliwa dla badanego silnika o ZS. Algorytm został opracowany z wykorzystaniem danych doświadczalnych dla punktów pracy silnika, które odpowiadają czterem różnym prędkościom obrotowym wału korbowego: 1300 obr/min, 1550 obr/min, 1800 obr/min i 2100 obr/min. Zgodnie z opracowanym algorytmem, lokalizacja punktu pracy silnika w obszarze ograniczonym przez jedną z trzech stref na wykresie, który został zbudowany na podstawie danych empirycznych, daje możliwość uzyskania optymalnej wartości  $A$  dla sterowanej turbiny. Algorytm został opracowany do stosowania w układzie sterowania silnika o ZS.

Szczegółowe badania silnika wyposażonego w turbosprężarkę o stałej geometrii lub prototyp turbosprężarki o zmiennych parametrach geometrycznych przeprowadzono również dla różnych trybów pracy według charakterystyki prędkościowej zewnętrznej. Tryby pracy silnika, odpowiadające zewnętrznej charakterystyce prędkościowej cechują się

maksymalnym poziomem obciążeń osiąganych w całym zakresie prędkości obrotowych wału korbowego. Zatem, jeśli silnik jest wyposażony w turbosprężarkę o stałej geometrii, nie występuje wówczas wystarczający dopływ powietrza do silnika w zakresie niskich prędkości obrotowych wału korbowego, co zostało stwierdzone w eksperymentach na badanym silniku w zakresie prędkości obrotowych wału korbowego od prędkości biegu jałowego do 1800 obr/min. Wiadomo, że taki nieoptymalny proces doprowadzania powietrza zawsze skutkowałby znacznym pogorszeniem kompletności spalania. Problem ten został wyeliminowany, gdy silnik wyposażono w nowy prototyp turbiny o zmiennych parametrach geometrycznych i z dwoma wlotami. Uzyskano wówczas lepsze charakterystyki zużycia paliwa i mniejszy poziom zadymienia spalin w trybach pracy według charakterystyki prędkościowej zewnętrznej, które mieszczą się w zakresie prędkości obrotowych wału korbowego od 1300 do 1800 obr/min. Minimalna wartość  $A$  w tych trybach pracy dała możliwość zwiększenia ciśnienia doładowania, a w konsekwencji wartości współczynnika  $\lambda$ , co doprowadziło do poprawy kompletności spalania paliwa wewnątrz cylindrów silnika. W efekcie zaobserwowano zwiększenie mocy użytecznej o 8,5 kW w trybie z  $n = 1300$  obr/min i o 6,8 kW w trybie z  $n = 1550$  obr/min. Osiągnięto to dzięki podniesieniu wartości  $\lambda$  (od 2,06 do 2,2), co spowodowało obniżenie temperatury spalin. Zmniejszenie maksymalnej temperatury spalin (o 40 K w trybie z  $n = 1300$  obr/min) pozwoliło na zwiększenie maksymalnej mocy silnika przy zastosowaniu prototypowego sterowania turbiny. Jednocześnie moment obrotowy wzrósł o 42 Nm (5,7%) przy  $n = 1550$  obr/min i o 62,5 Nm (9%) przy  $n = 1300$  obr/min. Podczas gdy turbosprężarka o zmiennych parametrach geometrycznych była używana, obniżenie jednostkowego zużycia paliwa wyniosło 9,7 g / kWh ( $n = 1300$  obr/min) i 7,5 g / kWh ( $n = 1550$  obr/min). W trybach pracy silnika zbliżonych do trybów mocy nominalnej (w zakresie prędkości obrotowych od  $n = 1810$  obr/min do  $n = 2100$  obr/min), wartość współczynnika  $\lambda$  w silniku o ZS wyposażonym w turbosprężarkę o stałej geometrii wzrosła i stała się bardziej korzystną z punktu widzenia zużycia paliwa, dlatego na przykład w trybie charakterystyki prędkościowej zewnętrznej, przy  $n = 1810$  obr/min, różnica w jednostkowym zużyciu paliwa wyniosła mniej niż 2 g / kWh przy porównywaniu sterowanej turbosprężarki i seryjnej turbosprężarki o stałych parametrach geometrycznych.

Zwiększone ciśnienie doładowania, gdy zastosowano nowy prototyp turbosprężarki o zmiennych parametrach geometrycznych, przede wszystkim przy pracy silnika według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej w zakresie prędkości obrotowych wału korbowego od 1300 do 1800 obr/min, pozwoliło na dostarczenie większej ilości powietrza do cylindra, uzyskanie wyższych wartości współczynnika  $\lambda$  i w efekcie uzyskanie zmniejszenia poziomu

zadymienia spalin. W pracy został również zaprezentowany wykres redukcji poziomu zadymienia spalin  $\Delta N$ . Zależność  $\Delta N$  od prędkości obrotowej wału korbowego silnika została opisana za pomocą równania wielomianowego ze współczynnikiem R-kwadrat dla stóp wielomianowych 0,99. Zależność ta była później wykorzystana do oceny redukcji zadymienia spalin w kluczowym trybie pracy silnika, którym jest punkt charakterystyki prędkościowej zewnętrznej o prędkości obrotowej wału korbowego  $n = 1000$  obr/min. We tym trybie pracy silnika oczekiwana redukcja  $\Delta N$  przy zastosowaniu prototypu sterowanej turbosprężarki wynosiła 20%.

Jednym z głównych wskaźników, stosowanych do oceny właściwości eksploatacyjnych silnika o ZS jest współczynnik elastyczności momentu obrotowego silnika. Sterowanie turbodoładowaniem za pomocą nowej metody pozwoliło na uzyskanie większej wartości tego wskaźnika. W badanym silniku o ZS maksymalny moment obrotowy jest osiągany przy  $n = 1550$  obr/min, a przy trybie mocy nominalnej moment obrotowy był zmierzony przy  $n = 2100$  obr/min. W przypadku stosowania sterowanej turbiny spowodowało to zwiększenie ciśnienia doładowania. Wzrost ciśnienia doładowania ma największe znaczenie przy pracy w trybach odpowiadających charakterystyce zewnętrznej w zakresie prędkości obrotowej wału korbowego od 1000 do 1550 obr/min, kiedy to z powodu niewystarczającego dopływu powietrza występuje jego niedobór i w efekcie nieoptymalna wartość współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ . Z drugiej strony, zwiększona ilość powietrza dostarczanego do cylindra zmniejsza temperaturę spalin przed turbiną. W efekcie pojawia się możliwość zwiększenia dawki paliwa, a w konsekwencji osiągnięcia wyższego poziomu maksymalnego momentu obrotowego w silniku wyposażonym w prototyp sterowanej turbosprężarki. W badanym silniku maksymalna dawka paliwa była ograniczona przez maksymalną dopuszczalną temperaturę spalin na wlocie do turbiny (963 K). Wyposażenie silnika w sterowany zespół turbodoładowania pozwoliło na zwiększenie elastyczności momentu obrotowego silnika o 7%. Ponadto udało się zwiększyć maksymalny moment obrotowy o 9% w trybie pracy odpowiadającym zewnętrznej charakterystyce prędkościowej przy  $n = 1300$  obr/min i o 5,7% przy  $n = 1550$  obr/min. Dla trybu mocy nominalnej, przy  $n = 2100$  obr/min, zwiększone ciśnienie doładowania nie miało wpływu na zużycie paliwa przez silnik przy zastosowaniu sterowanej turbosprężarki, ale wyższe ciśnienie doładowania doprowadziło do obniżenia temperatury spalin o 40 K, a tym samym do mniejszego poziomu obciążenia termicznego elementów silnika i turbiny. Zaletą takiej redukcji temperatury spalin była możliwość podniesienia mocy maksymalnej o 9,1% przy jednoczesnym zachowaniu poprzedniego poziomu niezawodności. Kolejnym zbadanym zagadnieniem, dotyczącym silnika o ZS

wyposażonego w sterowany zespół doładowania, była modyfikacja przebiegu momentu obrotowego i uzyskanie jego niemal stałych wartości w zakresie prędkości obrotowych wału korbowego od 1300 do 1550 obr/min.

Zatem, w wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż zastosowanie nowego prototypu turbosprężarki o zmiennych parametrach geometrycznych z dwoma wlotami gazu pozwala na poprawę zewnętrznej charakterystyki prędkościowej widlastego silnika o ZS w dwóch najważniejszych aspektach: możliwości zwiększenia maksymalnego momentu obrotowego lub uzyskania stałego przebiegu momentu obrotowego w badanym silniku przez wdrożenie odpowiedniego sterowania turbiną. Trzecią możliwością, rozpoznaną podczas badań eksperymentalnych, było zwiększenie maksymalnej mocy silnika. Opracowane podejście jest uniwersalne i może być używane do wszystkich silników (o ZS albo o ZI), w których stosowany jest sterowany układ doładowania ze zmiennymi parametrami geometrycznymi.

Oryginalne badania wpływu pola powierzchni najmniejszego przekroju kanału przyspieszenia gazu na wlocie do bezłopatkowej kierownicy  $A$  na wskaźniki pracy silnika i turbosprężarki w jednym ze statycznych punktów pracy silnika o ZS zostały również opisane w rozdziale 3. Badania eksperymentalne były przeprowadzone po raz pierwszy, a ich wyniki pozwoliły dokonać oceny jakości procesów zachodzących w sterowanej dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. Tryb pracy silnika, który był bliski punktu maksymalnego momentu obrotowego, został wybrany do analizy, ponieważ podstawowe parametry procesu roboczego silnika (i przede wszystkim jednostkowe zużycie paliwa) wyraźnie ulegają zmianie w procesie sterowania turbosprężarki. W turbinie zostały ustawione trzy różne wartości pola powierzchni  $A$ : 1442 mm<sup>2</sup>, 2065 mm<sup>2</sup> i 2312 mm<sup>2</sup>. W badaniach eksperymentalnych ustalono, iż zmniejszenie wartości  $A$  prowadzi do zwiększenia ciśnienia doładowania i współczynnika  $\lambda$ . Wpływa to pozytywnie na proces spalania. W efekcie jednostkowe zużycie paliwa zmniejszyło się o 5,8 g/kWh, wartość współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  wzrosła z 1,59 do 1,84, a temperatura spalin zmniejszyła się o 37 K.

Wyniki badań empirycznych wykazały, że w trybach pracy silnika o ZS, które charakteryzują się dużym obciążeniem i niską prędkością obrotową, korzyści wynikające ze sterowania turbiną przez zmianę pola powierzchni najmniejszego przekroju kanału przyspieszenia gazu na wlocie do bezłopatkowej kierownicy są ewidentne. W wymienionych trybach pracy silnika zalecane jest zmniejszenie wartości pola przekroju  $A$ . Pozwoli to zwiększyć ciśnienie doładowania i wartość  $\lambda$ , a tym samym poprawić proces spalania paliwa.

#### ***4.2.3. Opracowanie metody analizy zjawisk przepływowych w sterowanej dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych.***

W czwartym rozdziale monografii została przedstawiona autorska metoda analizy zjawisk przepływowych w sterowanej turbinie oraz koncepcja oryginalnego modelu matematycznego turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. Model ten, wykorzystując minimalną liczbę danych empirycznych, pozwala na przeprowadzenie analizy procesów w poszczególnych strefach turbiny, ocenę jej sprawności oraz zbilansowanie podstawowych strat pracy. Może on być wartościowym narzędziem przy projektowaniu nowych konstrukcji sterowanych turbin z bezłopatkową kierownicą.

Wiadomo, że jednym z głównych zagadnień w analizie zjawisk przepływowych, zachodzących w dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych, jest obliczenie strat w elementach turbiny, a także efektywnych i indykowanych wskaźników turbiny. Skuteczna realizacja tego zagadnienia obejmuje modelowanie zjawisk przepływowych wewnątrz turbiny z odpowiednim adekwatnym matematycznym opisem fizyki procesów zachodzącym w jej elementach.

W teorii maszyn przepływowych, jak również i w mechanice, poziomy modeli matematycznych są rozróżniane przez liczbę współrzędnych używanych na rozważanym etapie badania i oceny właściwości maszyn przepływowych. W ten sposób można zastosować modele zerowymiarowe, jednowymiarowe, dwuwymiarowe i trójwymiarowe, w zależności od postawionych zadań. Usystematyzowanie wiedzy, dotyczącej modeli matematycznych dośrodkowej turbiny stosowanych w praktyce inżynierskiej i badawczej, przedstawione zostało w rozdziale czwartym. Analiza wykazała, że pomimo postępu w trójwymiarowej obliczeniowej dynamice płynów, przewidywanie parametrów przepływu w wirniku dośrodkowej turbiny przy użyciu istniejących modeli turbulencji często daje niesatysfakcjonujące wyniki. Z drugiej strony, jeżeli strategia analizy polega na obliczeniu parametrów turbiny z wykorzystaniem empirycznych korelacji strat wprowadzonych do modelu jednowymiarowego, to takie podejście zapewnia szybkie i dokładne wyniki, w porównaniu z symulacjami w trójwymiarowej obliczeniowej dynamice płynów. Wniosek ten opiera się również na doświadczeniu zawodowym autora, związanym z projektowaniem maszyn przepływowych, a także bazuje na wynikach zaprezentowanych w innych pracach badawczych. Co więcej, niniejsza monografia jest pierwszym krokiem w analizie zjawisk przepływowych, zachodzących w nowej konstrukcji dośrodkowej turbiny o zmiennych parametrach geometrycznych z dwoma wlotami gazu do obudowy. Dlatego też na pierwszym etapie badań wystarczającym było opracowanie

jednowymiarowego modelu matematycznego dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą. W modelu tym zastosowano założenie, iż parametry gazu w średnim promieniu charakterystycznych kanałów turbiny są reprezentatywne dla całego pola przepływu. Inną zaletą tego podejścia jest możliwość kalibracji modelu w oparciu o wyniki empiryczne. Ponadto wymieniony model można łatwo zintegrować z modelem całej jednostki (na przykład, stworzyć oryginalny model matematyczny turbodoładowanego silnika spalinowego), co pozwoliłoby w przyszłości na przeprowadzenie kompleksowej optymalizacji.

W czwartym rozdziale monografii przedstawiono autorską koncepcję modelu matematycznego, służącego do analizy zjawisk przepływowych w sterowanej dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. Jako dane wejściowe, model matematyczny wykorzystuje minimalną liczbę danych empirycznych. Należy również określić stałe i zmienne wartości parametrów geometrycznych. Model matematyczny został stworzony zgodnie z podstawowymi założeniami przyjętymi w obliczeniach wirnikowych maszyn przepływowych (sprężarek i turbin), w których gazodynamiczne funkcje ciśnienia, natężenia przepływu i temperatury są wykorzystywane do określenia parametrów gazu w elementach turbiny. Omówione podejście zostało z powodzeniem zastosowane w wielu badaniach naukowych, jednak dla matematycznego modelowania zjawisk przepływowych w sterowanej dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych koncepcja ta została wykorzystana po raz pierwszy. Procedura obliczeniowa przewiduje podział przestrzeni wewnętrznej turbiny na strefy obliczeniowe i składa się z modelu matematycznego kanału przyspieszenia gazu ze zmienną geometrią, modelu kanału spiralnego turbiny, modelu wirnika i modelu dyfuzora wyjściowego. Strefy obliczeniowe są powiązane przez równość wartości parametrów gazu na wylocie z poprzedniej strefy i parametrów na wlocie do następnej strefy. Parametry spalin zostały uwzględnione jako charakterystyki płynu roboczego. Dla zwiększenia adekwatności modelu matematycznego, w trakcie obliczeń wykładnik adiabaty gazu podlega weryfikacji dla każdej charakterystycznej strefy turbiny dośrodkowej. Zatem przepływ gazu przez turbinę z bezłopatkową kierownicą jest uważany za adiabatyczny, ale w każdej strefie obliczenia są prowadzone z uwzględnieniem własnego wykładnika adiabatycznego. Głównymi danymi, niezbędnymi do modelowania matematycznego, są dokładne parametry geometryczne podstawowych komponentów turbiny, uzyskane za pomocą zweryfikowanego modelu 3D turbiny o zmiennych parametrach geometrycznych, a także następujące parametry spalin: ciśnienie statyczne i temperatura na wlocie do turbiny, ciśnienie statyczne i temperatura na



wylocie z bezłopatkowej kierownicy, ciśnienie statyczne i temperatura na wylocie z turbiny. Średnia chropowatość powierzchni kanału przyspieszenia gazu na wlocie do bezłopatkowej kierownicy również jest uwzględniana w modelu. Stworzony model matematyczny jest częścią algorytmu opracowanego przez autora do analizy zjawisk przepływowych w turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych.

Sześćoetapowy algorytm obejmuje następujące kroki:

- budowa zweryfikowanego trójwymiarowego modelu CAD dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych,
- wyznaczenie stałych i zmiennych wartości parametrów geometrycznych potrzebnych do modelowania matematycznego,
- określenie średniej arytmetycznej chropowatości powierzchni ( $R_a$ ) kanału przyspieszenia gazu ze zmiennymi parametrami geometrycznymi na wlocie do bezłopatkowej kierownicy,
- wyznaczenie ciśnienia statycznego i temperatury gazu na wlocie do turbiny, wylocie z bezłopatkowej kierownicy i wylocie z turbiny,
- symulacja zjawisk przepływowych w poszczególnych komponentach dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych,
- opracowanie wyników symulacji: wykresy prędkości na wlocie i wylocie z wirnika turbiny, bilans podstawowych strat w turbinie, komponenty pracy adiabatycznej turbiny, współczynniki strat, sprawności i moc na wału turbiny.

Główną zaletą opracowanego algorytmu jest minimalny zestaw danych eksperymentalnych, niezbędnych do analizy procesów w turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. Zmierzone podczas eksperymentu ciśnienia i temperatury były uzyskiwane na hamowni silnikowej. Model 3D dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych i dwoma wlotami gazu został stworzony przez autora na podstawie dokumentacji technicznej i rzeczywistego modelu turbosprężarki o stałej geometrii TKR-8,5 TV-03, która została wyprodukowana przez wyspecjalizowaną firmę naukowo-badawczą i produkcyjną Turbo-Vesta Ltd. (Ukraina). Model ten został sporządzony przez autora monografii w trójwymiarowym oprogramowaniu CAD SolidWorks. Wewnętrzna przestrzeń obudowy turbiny została dodatkowo sprawdzona i zweryfikowana przy użyciu modelu silikonowego. Zweryfikowany model umożliwił pomiar dokładnych charakterystyk geometrycznych sterowanej turbiny dla różnych położenia elementu wyprofilowanego, odpowiedzialnego za zmianę parametrów geometrycznych. Odpowiednia

metoda pomiaru chropowatości powierzchni została wybrana dla uzyskania średniej arytmetycznej chropowatości powierzchni w kanale przyspieszenia gazu na wlocie do bezłopatkowej kierownicy.

#### ***4.2.4. Matematyczne modelowanie zjawisk przepływowych w sterowanej dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych***

W rozdziale piątym monografii zostały przedstawione główne równania modelu matematycznego dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. Jak wspomniano wyżej, w modelu matematycznym przestrzeń wewnątrz turbiny została podzielona przez przekroje brzegowe, którymi są: wlot turbiny, wylot z kanału przyspieszenia gazu, wlot do wirnika, wylot z wirnika, wylot z turbiny. Strefy obliczeniowe są powiązane między sobą przez równość wartości brzegowych parametrów gazu: ciśnienia, gęstości, temperatury bezwzględnej i prędkości bezwzględnej (prędkości względnej dla wirnika). Lepkość spalin została uwzględniona w modelu matematycznym przez zależność empiryczną, w której lepkość jest funkcją temperatury i współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ . W modelu matematycznym szczególna uwaga została skupiona na modelowaniu zjawisk przepływowych w kierownicy bezłopatkowej o zmiennych parametrach geometrycznych. W tym celu potrzebnych było kilka parametrów podstawowych. Aby je obliczyć, zostały opracowane dwie specjalne metody. Pierwsza opiera się na modelu jednowymiarowym, w którym mechanizm strat został uwzględniony w modelu matematycznym w oparciu o dane empiryczne i podstawową teorię dyszy. Druga metoda przewiduje trójwymiarowe symulacje przepływu gazu w obudowie turbiny z bezłopatkową kierownicą, na przykład za pomocą oprogramowania komercyjnego. W obu metodach szczególną uwagę poświęcono obliczeniu średniego kąta przepływu na wylocie z bezłopatkowej kierownicy.

W modelu jednowymiarowym do obliczania średniego kąta przepływu na wylocie z bezłopatkowej kierownicy stosowano zależności półempiryczne. Zależności te uzyskano w oparciu o eksperymentalne badania zjawisk przepływowych w obudowach turbin z bezłopatkową kierownicą, w których została również uwzględniona geometria kanału przyspieszenia. Opracowano także specjalną metodologię obliczania parametrów gazu na wylocie z kanału przyspieszenia dla różnych położeń elementu wyprofilowanego.

Uśrednione parametry gazu w poszczególnych przekrojach obudowy turbiny z bezłopatkową kierownicą można również uzyskać w wyniku trójwymiarowych obliczeń przepływu gazu. Metoda ta została opisana w piątym rozdziale monografii. Podczas

modelowania zjawisk przepływowych w dośrodkowej turbinie występują sytuacje, gdy modelowanie trójwymiarowe przepływu gazu pozwala uzyskać zadowalający wynik. Uzasadnione jest to w przypadku, gdy potrzebne są uśrednione parametry gazu w przekrojach elementów statycznych turbiny, takich jak wylot z kanału przyspieszenia/wlot do bezłopatkowej kierownicy, wylot z bezłopatkowej kierownicy/wlot do wirnika. Zatem w warunkach przepływu niestacjonarnego, który występuje w omówionych przekrojach brzegowych, pomiar parametrów gazu za pomocą technik eksperymentalnych może być dość skomplikowany. W takich sytuacjach symulacyjne badanie trójwymiarowe przepływu gazu, oparte na eksperymentalnych danych, które zostałyby zadane jako warunki brzegowe, można uznać za podejście racjonalne. Ponadto, wyniki badań symulacyjnych pozwalają oszacować straty hydrauliczne w obudowie turbiny bez konieczności przeprowadzania badań eksperymentalnych, określanych jako „płukanie obudowy turbiny”. Z drugiej strony, uzyskana wartość kąta wyjścia strugi z bezłopatkowej kierownicy może być z kolei przekazana do jednowymiarowego modelu quasi-stacjonarnego albo wykorzystana przy wykreśleniu rozkładu prędkości na wlocie do wirnika turbiny. Dodatkowo, w wyniku symulacji można uzyskać uśrednione wartości ciśnienia statycznego i temperatury na wylocie z bezłopatkowej kierownicy. W związku z tym, do przeprowadzenia kompleksowej analizy zjawisk przepływowych w dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych potrzebna jest minimalna ilość danych eksperymentalnych. Dla sześciostopowego algorytmu, przedstawionego w rozdziale 4, jedynymi eksperymentalnie uzyskanymi parametrami byłyby ciśnienia statyczne i temperatury na wlocie i wylocie z turbiny, jak również średnia arytmetyczna chropowatości powierzchni ( $R_a$ ) kanału przyspieszenia.

Podsumowując należy podkreślić, iż opracowany model matematyczny jest uniwersalny i może być wykorzystywany nie tylko do modelowania zjawisk przepływowych w dośrodkowych turbinach o zmiennych parametrach geometrycznych, ale również do analizy i oceny sprawności ekspanderów stosowanych w układach realizujących obieg Rankine’a lub w turbinach układów zasilania powietrzem ogniwo paliwowych. W tym przypadku w modelu matematycznym muszą być uwzględnione parametry gazu (czynnika roboczego).

Opracowany model matematyczny został wykorzystany do symulacji zjawisk przepływowych w dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych i dwoma wlotami. Wyniki obliczeń oraz ich analiza zostały przedstawione w rozdziale 5 monografii. Parametry spalin i charakterystyki geometryczne turbiny były przyjęte do obliczeń w trybie pracy silnika, który był zbliżony do punktu maksymalnego

momentu obrotowego. Główną zaletą przeprowadzonego badania, opartego na eksperymencie, była analiza zjawisk przepływowych w warunkach rzeczywistej pracy silnika ze sterowaną turbosprężarką.

Analiza wyników obliczeń wykazała, że w trybie pracy silnika o mocy nominalnej  $N_e = 100$  kW i prędkości obrotowej wału korbowego  $n = 1550$  obr/min, zmniejszenie pola powierzchni  $A$  najmniejszego przekroju kanału przyspieszenia gazu na wlocie do bezłopatkowej kierownicy z  $2315$  mm<sup>2</sup> do  $1442$  mm<sup>2</sup> prowadzi do podniesienia mocy na wale turbiny o 36,8%. Ponadto, pomimo wzrostu wartości całkowitych strat w turbinie o 2,96 kJ/kg, praca indykatorowa zwiększyła się znacznie, bo o 17,5 kJ/kg.

#### ***4.2.5. Analiza energo-egzergetyczna turbodoładowanego silnika wyposażonego w dośrodkową turbinę z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych***

W oparciu o zasady analizy energo-egzergetycznej silników spalinowych, w rozdziale szóstym monografii została przedstawiona teoria oraz narzędzie w postaci modelu matematycznego, służącego do oceny skuteczności wykorzystania energii spalin w silniku o zapłonie samoczynnym, wyposażonym w sterowany zespół turbodoładowania z turbiną o zmiennych parametrach geometrycznych i z bezłopatkową kierownicą.

Wiadomo, że większość metod stosowanych do matematycznego i fizycznego modelowania procesów w silniku spalinowym (SS) wyposażonym w turbosprężarkę oparta jest na pierwszej zasadzie termodynamiki. Pozwalają one na wyszukiwanie sposobów poprawy jakości procesów wykorzystania ciepła w SS w celu osiągnięcia maksymalnej sprawności efektywnej. Takie podejście jest jednak niewystarczające do dokonania zaawansowanej analizy, która wymaga kompleksowego przeanalizowania procesów w cylindrze silnika spalinowego, a także w turbosprężarce. Taka kompleksowa analiza nazywana jest analizą energo-egzergetyczną, a podstawę do jej opracowania stanowi druga zasada termodynamiki. Z prac naukowych wynika, że ciepło lub entalpia składają się z egzergii i anergii. Egzergię można przekształcić w pracę w obecnych warunkach pracy maszyny energetycznej. Ponadto, analiza energo-egzergetyczna jest stosowana do oceny różnych procesów zachodzących w silnikach cieplnych. Na przykład, pozwala ona oszacować straty egzergii wewnątrz cylindra silnika spalinowego, jak również straty w takich elementach SS, jak chłodnica powietrza doładowującego, sprężarka, kolektor wydechowy, turbina, układy chłodzenia i smarowania. W monografii po raz pierwszy przedstawiono zastosowanie metody egzergetycznej do oceny skuteczności wykorzystania energii spalin w turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych

parametrach geometrycznych. W tym celu został opracowany schemat energetyczny turboprzężarki ze sterowaną turbiną, na podstawie którego wprowadzono pojęcie sprawności egzenergetycznej dla turbosprężarki, sprężarki i turbiny. Aby wyjaśnić poszczególne aspekty implementacji opisanych matematycznych modeli egzenergetycznych, dokonano przykładowej analizy procesów przetwarzania energii spalin w turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. Ocena przeprowadzono dla sterowanej turbiny z dwoma wlotami gazu do obudowy. Turbosprężarka ze sterowaną turbiną została zamontowana na czterosuwowym sześciocyndrowym widlastym silniku o ZS. Parametry czynnika roboczego (spalin) zostały wyznaczone w badaniach eksperymentalnych i uzupełnione danymi z obliczeń, których wyniki zostały zaprezentowane w rozdziale 5 monografii. Parametry odpowiadały trybowi pracy silnika o mocy  $N_e = 100$  kW i prędkości obrotowej wału korbowego  $n = 1550$  obr/min dla trzech różnych wartości pola powierzchni  $A$  najmniejszego przekroju kanału przyspieszenia gazu na wlocie do bezłopatkowej kierownicy. Następnie zostały obliczone straty egzergii, co pozwoliło ocenić wpływ sterowania dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą na jej sprawność egzenergetyczną. Analiza wykazała, że sprawność egzenergetyczna wzrasta z 95,5 do 96,3%, gdy w sterowanej turbinie ustawiono mniejszą wartość pola powierzchni  $A$ . Jest to dowodem słuszności hipotezy, iż skuteczność procesów przetwarzania energii w turbinie dośrodkowej może być poprawiona przez odpowiednie sterowanie jej parametrami geometrycznymi.

W monografii została zatem przedstawiona nowo opracowana kompleksowa metoda, służąca do oceny skuteczności procesów przetwarzania energii w dośrodkowych turbinach z kierownicą bezłopatkową. Teoria oraz odpowiadający jej model matematyczny, zaprezentowane w rozdziale 5, bazują się na tradycyjnym podejściu do analizy zjawisk przepływowych w sterowanej turbinie. Natomiast rozdział 6 opisuje alternatywne podejście, które wykorzystuje analizę energo-egzenergetyczną. Pozwala to na zbadanie różnych aspektów procesu rozprężania spalin w dośrodkowej turbinie z kierownicą bezłopatkową. Poza tym obydwie metody łączy fakt, iż różnica pomiędzy sprawnością egzenergetyczną i sprawnością efektywną sterowanej turbiny (wyliczoną według tradycyjnej metody) wskazuje na rzeczywiste rezerwy, pozwalające na poprawę procesów przetwarzania energii w określonym trybie pracy turbiny. Na koniec warto podkreślić, iż kompleksowa metoda ma uniwersalny charakter i może być stosowana dla układów doładowania silników spalinowych, układów zasilania powietrzem ogni paliwowych oraz układów realizujących obieg Rankine'a, służących do odzysku energii spalin.

### ***4.3 Podsumowanie oraz omówienie osiągniętych celów***

W monografii, w oparciu o szeroki zakres badań empirycznych oraz na podstawie kompleksowej analizy teoretycznej procesów przetwarzania energii zachodzących w turbinie, przedstawiono opracowaną teorię oraz zasady projektowania dośrodkowych turbin z kierownicą bezłopatkową, sterowanych za pomocą zmiany parametrów geometrycznych na wlocie do turbiny. W ten sposób osiągnięto cel pracy naukowej i spełniono następujące zadania:

- Opracowano nową koncepcję dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą, sterowanej za pomocą zmiany parametrów geometrycznych, która cechuje się minimalnymi stratami przepływu gazu, rozszerzonym zakresem sterowania i niezawodnością.
- Opracowano naukowe podstawy projektowania dośrodkowych turbin z kierownicą bezłopatkową, sterowanych za pomocą zmiany parametrów geometrycznych.
- Przeprowadzono badania empiryczne nowej konstrukcji dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych, dokonano oceny możliwości poprawy charakterystyk użytkowych silnika, wyposażonego w sterowaną turbosprężarkę, opracowano algorytm sterowania turbiną o zmiennych parametrach geometrycznych.
- Opracowano kompleksową metodę oraz narzędzie w postaci oryginalnych modeli matematycznych, służących do oceny skuteczności procesów przetwarzania energii w dośrodkowych turbinach z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. Metoda ta bazuje na modelowaniu zjawisk przepływowych w sterowanej turbinie, a także na analizie energo-egzergetycznej.
- Opracowane modele matematyczne zostały wykorzystane do oceny skuteczności procesów przetwarzania energii w dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych.

Opracowano więc nową koncepcję dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych, która cechuje się minimalnymi stratami przepływu gazu, rozszerzonym zakresem sterowania i niezawodnością, a na jej podstawie stworzono konstrukcję sterowanej turbosprężarki, zaprojektowanej na bazie turbiny o stałych parametrach geometrycznych. Wszystkie badania teoretyczne i eksperymentalne, powiązane z projektowaniem prototypów sterowanych turbosprężarek, zostały sfinalizowane w postaci kluczowych rekomendacji. Badania eksperymentalne wykazały wysoką wydajność i funkcjonalność nowego prototypu turbosprężarki, wyposażonego w turbinę z bezłopatkową

kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych, zaprojektowanego do doładowania widlastego silnika o ZS. Sterowanie dośrodkowej turbiny pozwoliło na osiągnięcie mniejszego zużycia paliwa w trybach pracy silnika o małym obciążeniu oraz według charakterystyki prędkościowej zewnętrznej. W ramach badań empirycznych zostało odkryte nowe zjawisko, zdefiniowane jako niewrażliwość zużycia paliwa przez silnik na sterowanie turbosprężarki. Ponadto zbadano trzy mechanizmy poprawy charakterystyk momentu i mocy widlastego silnika o ZS przez wdrożenie odpowiedniego sterowania turbiną, a mianowicie: zwiększenie maksymalnego momentu obrotowego, uzyskanie stałego przebiegu momentu obrotowego oraz podniesienie mocy maksymalnej silnika przy jednoczesnym zachowaniu poprzedniego poziomu niezawodności (w porównaniu do tego samego silnika, ale wyposażonego w turbosprężarkę o stałej geometrii). Opracowane podejście jest uniwersalne i może być stosowane do wszystkich silników (o ZS albo o ZI), w których stosowany jest sterowany układ doładowania o zmiennych parametrach geometrycznych. Aby przeanalizować skuteczność przetwarzania energii w dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych, została opracowana kompleksowa metoda. Metoda ta bazuje na oryginalnych modelach matematycznych oraz fundamentalnej analizie energo-egzergetycznej. Przy użyciu modelu matematycznego dokonano analizy zjawisk przepływowych w poszczególnych strefach turbiny, oceny jej sprawności oraz zbilansowania podstawowych strat pracy. Model ten może być bardzo użytecznym narzędziem przy projektowaniu nowych konstrukcji sterowanych turbin z bezłopatkową kierownicą. Metoda egzergetyczna została również wykorzystana do fundamentalnej analizy skuteczności wykorzystania energii spalin w dośrodkowej turbinie z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. Zastosowanie kompleksowej analizy pozwoliło na zbadanie procesu rozprężania spalin w sterowanej turbinie z różnych punktów widzenia. W tym miejscu należy podkreślić, że różnica pomiędzy sprawnością egzergetyczną oraz sprawnością efektywną sterowanej turbiny (wyliczoną według tradycyjnej metody) wykazuje istnienie rzeczywistych rezerw, pozwalających na poprawę procesów przetwarzania energii w określonym trybie pracy turbiny.

#### ***4.4. Wkład autora w rozwój dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn***

W monografii, w oparciu o szeroki zakres badań empirycznych oraz na podstawie kompleksowej analizy teoretycznej procesów przetwarzania energii zachodzących w turbinie, autor **po raz pierwszy** opisuje teorię oraz zasady projektowania dośrodkowych turbin

z kierownicą bezłopatkową, sterowanych za pomocą zmiany parametrów geometrycznych na wlocie do turbiny. Jest to nowa wiedza, która wzbogaca dyscyplinę budowy i eksploatacji maszyn. Koncepcja alternatywnego sterowania turbiną dośrodkową może być zastosowana w układach doładowania silników spalinowych, układach zasilania powietrzem ogniwo paliwowych, a także układach realizujących obieg Rankine'a, służących do odzysku energii spalin.

W szczególności autor monografii:

1. Usystematyzował wiedzę w zakresie najbardziej perspektywicznych zastosowań dośrodkowych turbin w budowie i eksploatacji maszyn, wśród których są powszechnie rozpowszechnione układy doładowania silników spalinowych oraz intensywnie rozwijające się rozwiązania techniczne w postaci układów zasilania powietrzem ogniwo paliwowych oraz układów realizujących obieg Rankine'a.
2. Odegrał wiodącą rolę w opracowaniu i opatentowaniu koncepcji alternatywnego sterowania turbiną dośrodkową układu doładowania silników spalinowych, w której zmiana parametrów geometrycznych odbywa się przez zmianę pola powierzchni najmniejszego przekroju kanału dolotowego w turbinie z kierownicą bezłopatkową. Opracował odpowiadające tej koncepcji konstrukcje sterowanych turbin z jednym lub dwoma wlotami, które zostały zbudowane na podstawie produkowanych seryjnie turbosprężarek o stałych parametrach geometrycznych.
3. Zaproponował własną metodę empirycznego badania silnika o zapłonie samoczynnym, wyposażonego w sterowany zespół turbodoładowania. Na podstawie wyników badań empirycznych opracował różne algorytmy sterowania prototypowych turbin dośrodkowych, ukierunkowane na uzyskanie optymalnych wybranych eksploatacyjnych parametrów pracy silnika w stanach statycznych według charakterystyk obciążeniowych i zewnętrznej charakterystyki prędkościowej.
4. Opracował autorską metodę analizy zjawisk przepływowych w sterowanej turbinie oraz oryginalny model matematyczny turbiny z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych. Model matematyczny, wykorzystując minimalną liczbę danych empirycznych, pozwala na przeprowadzenie analizy procesów w poszczególnych strefach turbiny, ocenę jej sprawności oraz zbilansowanie podstawowych strat pracy.



Model ten może być bardzo użytecznym narzędziem przy projektowaniu nowych konstrukcji sterowanych turbin z bezłopatkową kierownicą.

5. W oparciu o zasady analizy energo-egzergetycznej silników spalinowych opracował teorię oraz narzędzie w postaci modelu matematycznego, służącego do oceny skuteczności wykorzystania energii spalin w silniku o zapłonie samoczynnym, wyposażonym w sterowany zespół turbodoładowania z turbiną o zmiennych parametrach geometrycznych i z bezłopatkową kierownicą.
6. Wymienione w p. 4 i 5 teoria oraz odpowiadające jej modele matematyczne mają kompleksowy, uniwersalny charakter i mogą być zastosowane do oceny skuteczności procesów przetwarzania energii we wszelkich dośrodkowych turbinach z kierownicą bezłopatkową: w układach doładowania silników spalinowych, w turbinach stosowanych w układach zasilania powietrzem ogni w paliwowych oraz w układach realizujących obieg Rankine'a, służących do odzysku energii spalin.

Ze względu na to, iż monografia po raz pierwszy opisuje teorię oraz zasady projektowania dośrodkowych turbin z kierownicą bezłopatkową, sterowanych według opatentowanej alternatywnej metody za pomocą zmiany parametrów geometrycznych na wlocie do turbiny, można wymienić następujące dalsze kierunki rozwoju tej tematyki badań:

1. Podstawy inżynierii dośrodkowych turbin z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych, które zostały opracowane na podstawie badań eksperymentalnych i teoretycznych prowadzonych na prototypach sterowanych turbosprężarek, mogą być wykorzystane w przyszłości przy projektowaniu dośrodkowych turbin turbokompresorów stosowanych w układach zasilania powietrzem ogni w paliwowych. Rekomendacje te można również wziąć pod uwagę przy opracowywaniu ekspanderów układów realizujących obieg Rankine'a, służących do odzysku energii spalin.
2. Nowa kompleksowa metoda, stworzona na podstawie analizy zjawisk przepływowych w dośrodkowych turbinach z bezłopatkową kierownicą o zmiennych parametrach geometrycznych oraz analizy energo-egzergetycznej, która została opracowana, a następnie zweryfikowana, może być wykorzystana do oceny skuteczności procesów przemiany energii zachodzących w sterowanej turbinie zaprojektowanej do układów zasilania powietrzem ogni w paliwowych oraz układów realizujących obieg Rankine'a.

3. Zweryfikowany trójwymiarowy model prototypu sterowanej turbosprężarki, który został stworzony dla uzyskania dokładnych parametrów geometrycznych sterowanej turbiny z dwoma wlotami, w przyszłości będzie wykorzystywany do przeprowadzenia zaawansowanych badań zjawisk przepływowych z wykorzystaniem trójwymiarowych symulacji przepływu gazu w obudowie turbiny z bezłopatkową kierownicą. W tym celu została opracowana nowa metoda, służąca do wyznaczenia średniego kąta przepływu na wylocie z bezłopatkowej kierownicy dośrodkowej turbiny, którą opisano w rozdziale 5 monografii.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych**

### **5.1. Charakterystyka dorobku naukowego publikacyjnego<sup>1</sup>**

#### **a) Rozdziały z książek:**

- [1] Marchenko A., Osetrov A., Linkov O., Samoilenko D.: Simulation of biofuels combustion in diesel engine, w: Biodiesel – Feedstock, Production and Applications / Fang Zhen (red.), 2012, IntechOpen Limited, ISBN 9789535109105, ss. 407-433.

#### **b) Czasopisma znajdujące się w bazie Journal Citation Reports (JCR):**

- [2] Samoilenko D., Cho H.M: Improvement of combustion efficiency and emission characteristics of CI diesel engine operating on ESC cycle applying Variable Geometry Turbocharger (VGT) with vaneless turbine volute, w: International Journal of Automotive Technology, vol. 14, nr 4, 2013, ss. 521-528 (IF 0,821 (2013)); 20 pkt MNiSW.
- [3] Samoilenko D., Marchenko A., Cho H.M: Improvement of torque and power characteristics of V-type diesel engine applying new design of Variable geometry turbocharger (VGT), w: Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 31, nr 10, 2017, ss. 5021-5027 (IF 1,19 (2017)); 20 pkt MNiSW.

#### **c) Czasopisma inne oraz publikacje konferencyjne:**

- [4] Orliński P., Gis M., Bednarski M., Novak N., Samoilenko D., Prokchorenko A.: The legitimacy of using hybrid vehicles in urban conditions in relation to empirical studies

---

<sup>1</sup> Merytoryczny i procentowy wkład habilitanta w powstanie tych prac został określony w wykazie opublikowanych prac naukowych.

- in the WLTC cycle, w: Problemy Eksploatacji. Maintenance Problems, nr 1/2019, s. 25-30 (12 pkt MNiSW)
- [5] Wojs M. K., Samoilenko D., Orliński P., Bednarski M.: Evaluation of the heat release in the various phases of the FAME type fuel combustion process in the compression ignition engine, w: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 421, 2018, ss. 1-5, DOI:10.1088/1757-899X/421/4/042081 (15 pkt MNiSW)
- [6] Chun Chang, Samoilenko D., Md. Abul Kalam, Young Duck Yun Y.D., Cho H.M.: The Influence of the Piston Surface Shapes on Biodiesel Combustion in Compression Ignition Engine, w: Transport Means, vol. 2, 2018, ss. 860-863 (15 pkt MNiSW)
- [7] Prokhorenko A., Samoilenko D., Kravchenko P., Karyagin I.: IoT solutions for Internal Combustion Engine Test Bench, w: Transport Means, vol. 2, 2018, ss. 380-383 (15 pkt MNiSW)
- [8] Wojs M. K., Samoilenko D., Orliński P., Bednarski M.: Influence of Using Ozonized Diesel Fuel on Exhaust Gases Toxic Emissions in a Compression Ignition Engine, w: Transport Means, vol. 2, 2018, ss. 869-872 (15 pkt MNiSW)
- [9] Prokhorenko A., Samoilenko D., Orliński P., Bednarski M., Kravchenko S., Karyagin I.: Subsystem of positioning the actuator for an electronic diesel control system, w: Problemy Eksploatacji. Maintenance Problems, vol. 1, 2018, ss. 103-110 (12 pkt MNiSW)
- [10] Prokhorenko A., Samoilenko D., Orliński P., Wojs M.K., Kravchenko P., Taianin D.: The basic algorithm of the all-speed governor with electronic control and its hardware implementation, w: Problemy Eksploatacji. Maintenance Problems, nr 2/2018, 2018, ss. 95-100 (12 pkt MNiSW)
- [11] Samoilenko D.: The new method of determination of the mean outlet angle in the vaneless volute diffusor of the centripetal turbine, w: Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, vol. 115, nr 1, 2018, ss. 47-54 (8 pkt MNiSW)
- [12] Xu Changchun, Samoilenko D., Cho H.M.: A study of the design of the resonator for reducing resonance noise of intake system in vehicle, w: Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, vol. 115, nr 1, 2018, ss. 5-12 (8 pkt MNiSW)
- [13] Bednarski M., Samoilenko D., Orliński P., Sikora M.: Evaluation of the Diesel Engine Parameters after Regeneration of its Fuel Delivery System, w: Transport Means, vol. 2, 2017, ss. 547-553 (15 pkt MNiSW)

- [14] Prokhorenko A., Samoilenko D., Meshkov D., Savchenko A.: Determination of the air excess factor in diesel engine fueled by water fuel emulsion, w: Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, vol. 5(114), 2017, ss. 35-43 (8 pkt MNiSW)
- [15] Samoilenko D., Marchenko A., Prokhorenko A.: An alternative method of variable geometry turbine adjustment: a comparative evaluation of alternative method and nozzle ring adjustment, w: 20th International Conference Transport Means 2016. Proceedings, Kersys Robertas (red.), w: Transport Means, 2016, Publishing House "Technologija", ss. 517-521 (15 pkt MNiSW)
- [16] Meshkov D., Samoilenko D., Prokhorenko A.: Perspectives of using a linear piezoelectric converter in a fuel injection system of Common Rail, w: Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, vol. 109, nr 5, 2016, ss. 69-76 (8 pkt MNiSW)
- [17] Prokhorenko A., Samoilenko D.: Discrete Frequency Method of Power Control for HCCI-engine, w: Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, vol. 105, nr 1, 2016, ss. 5-12 (8 pkt MNiSW)
- [18] Samoilenko D., Prokhorenko A., Marchenko A.: Simulation of processes in variable geometry turbine of high-speed diesel engine, w: 19th International Conference Transport Means 2015. Proceedings / Kersys Robertas (red.), 2015, Publishing House "Technologija", ISBN 9955-09-935-6, ss. 5-8 (15 pkt MNiSW)
- [19] Marchenko A., Samoilenko D., Hamzah A.A., Hamzah O.A.: Ways of using waste energy from IC engines exhaust gases, w: Двигатели внутреннего сгорания. nr 2, 2015, ss. 22-26.
- [20] Prokhorenko A., Marchenko A., Samoilenko D.: The method of determination of Vibe function for mathematical description of combustion process in Diesel, w: 18th International Conference Transport Means 2014. Proceedings / Kersys Robertas (red.), Transport Means, 2014, Kaunas University of Technology, ss. 38-42 (15 pkt MNiSW)
- [21] Samoilenko D., Batuk M.: Computational and experimental research of autotractor diesel with variable geometry turbocharger, w: Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія, vol. 13, nr 1, 2014, ss. 221-227 (publikacja w języku ukraińskim)
- [22] Marchenko A., Samoilenko D., Hamzah A. A., Hamzah O. A.: Waste heat recovery systems for internal combustion engines: classification and benefits, w: Двигатели внутреннего сгорания. nr 2, 2014, ss. 37-41.

- [23] Marchenko A., Samoilenko D., Hamzah O.A.: The problems of utilization of flare gases in internal combustion engines, w: Двигатели внутреннего сгорания. nr 2, 2013, ss. 55-61.
- [24] Samoilenko D.: New design of the tractor exhaust muffler based on computational fluid dynamics analysis, w: Двигатели внутреннего сгорания. nr 1, 2013, ss. 72-74.
- [25] Samoilenko D., Cho H.M., Prochorenko A.: Experimental Investigations of CI diesel engine and VGT with vaneless turbine volute, w: Journal of Maritime Transport and Engineering, Vol. 2, Nr 1, 2013, ss. 51-60.
- [26] Prokhorenko A., Parsadanov I., Samoilenko D.: An innovation design of the muffler for tractor diesel, w: Двигатели внутреннего сгорания. nr 1, 2013, ss. 61-65 (publikacja w języku rosyjskim)
- [27] Samoilenko D.: Simulation of diesel engine and variable geometry turbocharger (VGT) with vaneless turbine volute, w: Двигатели внутреннего сгорания. nr 1, 2012, ss. 29-34.
- [28] Prochorenko A., Meshkov D., Samoilenko D.: A choice of a main construction parameters in electrohydraulic injector of a diesel engine, w: Авиационно-космическая техника и технология, nr 10, 2011, ss. 192-196 (publikacja w języku rosyjskim)
- [29] Prochorenko A., Meshkov D., Samoilenko D.: Design parameters optimisation in piezo-quartz diesel injector, w: Вісті Автомобільно-дорожнього інституту, Nr. 10, 2010, ss. 47-53 (publikacja w języku rosyjskim)
- [30] Prochorenko A., Samoilenko D., Meshkov D.: Mathematical Model of the Fuel Feed Process by the System Of "Common Rail" with the Piezoelectric Injector, w: Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник, Nr 1(8), 2009, ss. 6-12 (publikacja w języku rosyjskim)

**d) Patenty:**

- [1] Petrosyancz V., Karnauxov Y., Marchenko A., Samoilenko D. Method for adjusting an inflow turbine provided with vaneless distributor. Patent PCT: WO 2006/036134 A1, Data zgłoszenia: 21-09-2005; Data udzielenia (decyzji): 06-04-2006 (w języku angielskim).
- [2] Petrosyancz V., Karnauxov Y., Marchenko A., Samoilenko D. Method of control centripetal turbine with vaneless guide assembly. Patent Federacji Rosyjskiej RU 2 298

652 C2, Data zgłoszenia:18-10-2004; Data udzielenia (decyzji): 10-05-2007. Biuletyn Nr13 (w języku rosyjskim oraz angielskim).

- [3] Петросянц В., Карнаухов Ю., Марченко А., Самойленко Д. Спосіб регулювання доцентрової турбіни з безлопатковим направляючим апаратом. Patent Ukrainy 79457, Data zgłoszenia:27-09-2004; Data udzielenia (decyzji): 15-12-2006. Biuletyn Nr 9 (w języku ukraińskim).
- [4] Petrosyancz V., Karnauхов Y., Marchenko A., Samojlenko D. Способ регулирования центростремительной турбины с безлопаточным направляющим аппаратом. Patent Republiki Białoruś BY 9963 C1, Data zgłoszenia:26-09-2005; Data udzielenia (decyzji): 30-06-2007 (w języku rosyjskim).

**e) Raporty z projektów badawczych:**

- [5] Samoilenko D. (2009). Zwiększenie efektywności wykorzystania gazu ziemnego w silnikach samochodowych. Sprawozdanie merytoryczne z realizacji międzynarodowego ukraińsko-koreańskiego projektu M/360-2008 (numer państwowej rejestracji: 0108U006928). Kijów: Ministerstwo Edukacji i Nauki Ukrainy.
- [6] Samoilenko D. (2010). Opracowanie rozwiązań umożliwiających zachowanie wysokiego poziomu ekonomicznych oraz ekologicznych wskaźników silników spalinowych przy wykorzystaniu paliw alternatywnych. Rozdział do raportu z realizacji projektu numer 0109U002386, finansowanego ze środków budżetu Ukrainy. Charków: Narodowy Uniwersytet Techniczny w Charkowie „KhPI”, Zakład Silników Spalinowych.
- [7] Samoilenko D. (2011). Uzasadnienie i dobór elementów konstrukcji silników spalinowych ze względu na wykorzystanie paliw tradycyjnych i alternatywnych. Rozdział do raportu z realizacji projektu numer 0111U002265, finansowanego ze środków budżetu Ukrainy. Charków: Narodowy Uniwersytet Techniczny w Charkowie „KhPI”, Zakład Silników Spalinowych.
- [8] Samoilenko D. (2012). Integracja fizycznych i chemicznych procesów spalania z jednoczesnym sterowaniem parametrami wpływającymi na wskaźniki ekonomiczne, ekologiczne i niezawodnościowe pojazdów transportowych z silnikami spalinowymi. Rozdział do raportu z realizacji projektu numer 0112U000404, finansowanego ze środków budżetu Ukrainy. Charków: Narodowy Uniwersytet Techniczny w Charkowie „KhPI”, Zakład Silników Spalinowych.

[9] Samoilenko D. (2014). Poprawa sprawności energetycznej i wskaźników ekologicznych tłokowych silników spalinowych poprzez wdrażanie współczesnych sposobów sterowania i zarządzania procesami roboczymi. Rozdział do raportu z realizacji projektu numer 0113U000429, finansowanego ze środków budżetu Ukrainy. Charków: Narodowy Uniwersytet Techniczny w Charkowie „KhPI”, Zakład Silników Spalinowych.

**f) Książki redagowane:**

[10] Samoilenko D. (red.), Samoilenko D., Bednarski M., Lasocki J., Kamela W., Wojs M., Orliński P. Laboratory of Combustion Engines Theory, 2018, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 978-83-7814-804-3, 96 s.

**g) Opis zagadnień naukowych poruszanych w publikacjach:**

W wymienionych wyżej publikacjach znaczny nacisk położono na poprawę sprawności energetycznej i wskaźników ekologicznych tłokowych silników spalinowych przez wdrażanie współczesnych sposobów sterowania silnika, zastosowanie alternatywnych metod i konstrukcji zespołów turbodoładowania, opracowanie nowych elementów układu zasilania, wykorzystanie paliw alternatywnych. Większość badań obejmowała również pogłębioną analizę procesu spalania oraz wyjaśnienie mechanizmów powstawania związków szkodliwych w spalinach. W wyniku **samodzielnie** prowadzonych badań:

- Opracowano konstrukcję tłumika do silnika ciągnika, która cechuje się minimalnymi stratami przepływu. Model 3D przekazano producentowi ciągników. Zagadnienia te omówiono w pracy [24]
- Przeprowadzono badania teoretyczne w celu oceny wpływu sterowania turbosprężarki na wskaźniki charakteryzujące proces roboczy silnika o ZS. W badaniach został wykorzystany zmodyfikowany model matematyczny zamkniętego obiegu silnika spalinowego z uwzględnieniem sterowania turbiną. Wyniki tych badań są opisane w pracy [27]
- Opracowano nową metodę wyznaczania średniego kąta przepływu na wylocie z bezłopatkowej kierownicy dośrodkowej turbiny. Metoda ta wykorzystuje dane uzyskane z symulacji 3D przepływu gazu wewnątrz turbiny. Zagadnienia te szczególnie omówiono w pracy [11], a niektóre podstawowe założenia - również w jednym z podrozdziałów monografii, stanowiącej główny dorobek naukowy .

Publikacje, które powstały w wyniku prowadzonych prac badawczych, realizowanych **zespołowo**, można podzielić na kilka tematycznie powiązanych zestawów.

**Pierwszy zestaw** związany był ze sterowanymi układami turbodoładowania silników o ZS. W celu poddania krytycznej analizie opatentowanej koncepcji sterowania dośrodkowej turbiny z bezłopatkową kierownicą (autor jest współwłaścicielem patentów), najbardziej wartościowe wyniki badań empirycznych opublikowano w czasopismach, należących do najpoważniejszych koreańskich stowarzyszeń naukowych w dziedzinie inżynierii mechanicznej: Koreańskiego Towarzystwa Inżynierów Samochodowych (The Korean Society of Automotive Engineers) – publikacja [2] oraz Koreańskiego Towarzystwa Inżynierów Mechaników (Korean Society of Mechanical Engineers) – publikacja [3]. Zagadnienia omówione w publikacjach [2] i [3] zostały uzupełnione przez wyniki badań empirycznych przedstawione w pracy [25], a także szereg badań teoretycznych, omówionych w pracy [15], dotyczących oceny wpływu różnych sposobów sterowania turbosprężarki na wskaźniki pracy silnika o ZS. Ponadto artykuł [21] przedstawia wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentów przeprowadzonych na hamowni, w ramach których uzyskano podstawowe parametry procesu roboczego silnika o ZS z układem turbodoładowania o zmiennych parametrach geometrycznych. Ten cykl publikacji zamyka praca [18], w której w oparciu o wyniki trójwymiarowej symulacji przepływu gazu dokonano oceny wpływu sterowania turbosprężarką na sprawność kanału międzyłopatkowego wirnika turbiny.

**Drugi zestaw** związany był z zaprezentowaniem wyników badań dotyczących zasilania silników spalinowych różnego rodzaju paliwami, a mianowicie badania procesów spalania tradycyjnych i alternatywnych paliw w tłokowych silnikach spalinowych o ZS oraz zagadnień związanych z powstawaniem związków szkodliwych w silniku o zapłonie samoczynnym, zasilanym paliwem ciekłym poddanym procesowi ozonowania – zagadnienia związane z tą tematyką zostały przedstawione w pracach [1], [5], [8], [14] i [20].

**W trzecim zestawie** nacisk położono na projektowanie, budowę oraz badania doświadczalne i numeryczne, mające na celu opracowanie nowych liniowych przetworników piezoelektrycznych, które mogą być zastosowane w układach wtryskowych typu Common Rail. Takie rozwiązanie jest alternatywnym do istniejących. Projekt został opracowany we współpracy z Laboratorium Mikroelektroniki Politechniki Kijowskiej. Zagadnienia związane z tą tematyką zostały przedstawione w pracach [16], [28], [29] i [30].



**Czwarty zestaw** powstał we współpracy pomiędzy Zakładem Silników Spalinowych Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej i Zakładem Silników Spalinowych Narodowego Uniwersytetu Technicznego „Charkowski Instytut Politechniczny” (Ukraina). W ramach współpracy opracowano algorytm oraz projekt elektronicznie sterowanego układu zasilania paliwem silnika o ZS. Zagadnienia te omówiono w artykułach [9] i [10], w których przedstawiono wyniki badań teoretycznych oraz empirycznych zaprojektowanego elektronicznego regulatora prędkości układu sterowania wtryskiem paliwa w silniku o zapłonie samoczynnym.

**Piąty zestaw** związany był z zagadnieniami wykorzystania odpadowej energii cieplnej w celu wytwarzania energii elektrycznej. Zagadnienia te przedstawiono w pracach [19], [22] i [23].

Oprócz wyżej wymienionych publikacji, tworzących pięć logicznie powiązanych zestawów, powstał również szereg oryginalnych pojedynczych prac, w których:

- opracowano oryginalną metodę sterowania mocą w silniku HCCI – zagadnienia te przedstawiono w pracy [17],
- we współpracy z naukowcami z Zakładu Silników Spalinowych Narodowego Uniwersytetu Technicznego „Charkowski Instytut Politechniczny” (Ukraina) stworzono inteligentną hamownię silnikową w oparciu o technologię Internetu Rzeczy – koncepcja ta została przedstawiona w pracy [7],
- dokonano oceny parametrów eksploatacyjnych oraz stężenia związków szkodliwych w spalinach silnika o zapłonie samoczynnym po regeneracji wtryskiwaczy za pomocą specjalnego dodatku do paliwa – zagadnienia te przedstawiono w pracy [13],
- we współpracy z naukowcami z Narodowego Uniwersytetu Kongju (Korea Południowa) oraz Uniwersytetu Malaya (Malezja) przeprowadzono badania symulacyjne, w ramach których analizowano wpływ kształtu tłoka na proces spalania biopaliw w silniku o zapłonie samoczynnym. Badania naukowe przebiegały w ramach międzynarodowego programu współpracy, wspieranego przez Państwową Fundację Badań Naukowych Republiki Korei (NRF-2017K2A9A1A01092911); zagadnienia te omówiono w pracy [6],
- we współpracy z naukowcami z Narodowego Uniwersytetu Kongju (Korea Południowa) opracowano nową konstrukcję zintegrowanego rezonatora

o zmniejszonych wymiarach, która zajmuje mniej przestrzeni w komorze silnika samochodu – zagadnienia te omówiono w pracy [12],

- opracowano konstrukcję tłumika do ciągnika rolniczego o gabarytach mniejszych w porównaniu z seryjnym elementem, przy jednoczesnym zachowaniu charakterystyk akustycznych oraz właściwości aerodynamicznych – zagadnienia te omówiono w pracy [26],
- w zespole międzynarodowym poprowadzono badania w celu weryfikacji zalet stosowania pojazdów z układami hybrydowymi. Testy porównawcze zostały przeprowadzone na hamowni podwoziowej. Przedmiotem badań były dwa pojazdy – jeden z klasycznym układem napędowym, a drugi z układem hybrydowym, w aktualnym homologacyjnym cyklu jezdnym WLTC (procedura WLTP). Zagadnienia te omówiono w pracy [4].

Uzyskane wyniki badań naukowych uzupełniają wyniki, które przedstawiono w monografii, spełniając warunek oryginalności oraz znaczącego wkładu w rozwój dyscypliny „Budowa i eksploatacja maszyn”. Opracowane konstrukcje i układy, a także algorytmy sterowania, są nowatorskimi rozwiązaniami, gotowymi do zastosowania.

## **5.2. Zestawienie dorobku naukowego:**

Liczba publikacji (po doktoracie):

- Monografie: 1
- Rozdziały w monografiach: 1
- Publikacje w czasopismach z listy JCR: 2
- Publikacje w czasopismach WoS: 5
- Publikacje w czasopismach Scopus: 10
- Publikacje w czasopismach na liście B: 8
- Łączna liczba publikacji (po doktoracie): 30

Statystyki:

- Sumaryczna wartość Impact Factor: 2,011  
Publikacja [2] – rok publikacji elektronicznej 2013 – IF 0,821  
Publikacja [3] – rok publikacji elektronicznej 2017 – IF 1,19
- Liczba cytowań oraz indeks Hirscha wg. bazy Web of Science (w oparciu o opcję *Cited Reference Search*)

- Liczba cytowań: 7
- Liczba cytowań (bez autocytowań): 5
- H-index: 1
  
- Liczba cytowań oraz indeks Hirscha wg. bazy Scopus
  - Liczba cytowań: 10
  - Liczba cytowań (bez autocytowań): 8
  - H-index: 1
  
- Liczba cytowań oraz indeks Hirscha wg. bazy Google Scholar:
  - Liczba cytowań: 55 (45 po doktoracie)
  - Liczba cytowań (bez autocytowań): brak danych
  - H-index: 4

### **5.3. Udział w projektach badawczych**

- a) Projekty międzynarodowe, realizowane w roli głównego wykonawcy poszczególnych etapów naukowo-badawczych:
- [1] Międzynarodowy ukraińsko-koreański grant numer M/360-2008, realizowany wspólnie z uniwersytetem Kongju (Korea Południowa) pt. „Zwiększenie efektywności wykorzystania gazu ziemnego w silnikach samochodowych”. Termin wykonania: 2008–2010 r., numer państwowej rejestracji: 0108U006928.
- [2] Międzynarodowy ukraińsko-litewski grant pt. „Analiza i modelowanie matematyczne kinetycznych wskaźników procesu spalania biopaliwa w czterosuwowym silniku diesla”. Termin wykonania: 05.2008–11.2008 r., numer państwowej rejestracji: 0108U010019.
- b) Projekty finansowane przez Ministerstwo Edukacji i Nauki Ukrainy, realizowane w roli głównego wykonawcy poszczególnych etapów naukowo-badawczych:
- [1] Opracowanie rozwiązań umożliwiających zachowanie wysokiego poziomu ekonomicznych oraz ekologicznych wskaźników silników spalinowych przy wykorzystaniu paliw alternatywnych. Termin wykonania: 2009–2010 r., numer państwowej rejestracji: 0109U002386.

- [2] Uzasadnienie i dobór elementów konstrukcji silników spalinowych ze względu na wykorzystanie paliw tradycyjnych i alternatywnych. Termin wykonania: 2011–2012 r., numer państwowej rejestracji: 0111U002265.
- [3] Integracja fizycznych i chemicznych procesów spalania z jednoczesnym sterowaniem parametrami wpływającymi na wskaźniki ekonomiczne, ekologiczne i niezawodnościowe pojazdów transportowych z silnikami spalinowymi. Termin wykonania 2012–2014 r., numer państwowej rejestracji: 0112U000404.
- [4] Poprawa sprawności energetycznej i wskaźników ekologicznych tłokowych silników spalinowych poprzez wdrażanie współczesnych sposobów sterowania i zarządzania procesami roboczymi”. Termin wykonania 2013–2014 r., numer państwowej rejestracji: 0113U000429.

#### Opis projektów:

W ramach projektów badawczych zrealizowano wiele prac doświadczalnych i symulacji numerycznych dotyczących sposobów poprawy charakterystyk silników spalinowych przez wykorzystanie nowych rozwiązań konstruktorskich i algorytmów sterowania w układach zasilania i doładowania turbosprężarkowego oraz wykorzystania paliw i materiałów alternatywnych w silnikach spalinowych. W trakcie projektów zbudowano kilka stanowisk badawczych w Narodowym Uniwersytecie Technicznym „Charkowski Instytut Politechniczny” oraz w Narodowym Uniwersytecie Kongju (Korea Południowa) a także stworzono laboratorium technik modyfikacji powierzchni metali z wykorzystaniem plazmy w Narodowym Uniwersytecie Technicznym „Charkowski Instytut Politechniczny”.

#### **5.4. Nagrody za działalność naukową:**

- [1] Laureat Nagrody Gabinetu Ministrów Ukrainy za szczególne osiągnięcia młodzieży w rozwoju Ukrainy w nominacji za osiągnięcia naukowe (2011 r.)

*Dmytro Sawoilenko*  
.....  
podpis

*15.04.2019*  
.....