

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Trawińskiego  
pt.

*„Analityczno-aproksymacyjny model matematyczny bloku  
gazowo-parowego dla celów diagnostyczno-ewaluacyjnych”*

dla

Rady Naukowej Dyscypliny

Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

Politechniki Warszawskiej

Promotor rozprawy : **prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda**

Promotor pomocniczy rozprawy : **dr inż. Marcin Wołowicz**

Podstawa opracowania recenzji :  
pismo przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny  
Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka  
**Prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego**  
Nr RND- IŚGiE/21/2024 z dnia 23.01.2024 r.

Umowa o dzieło Nr 1130 / 2024 zawarta pomiędzy Politechniką Warszawską,  
Wydziałem Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa 00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 24,  
reprezentowanym przez **prof. dr. hab. inż. Janusza Frączka**, Dziekana Wydziału,

Przedłożona do recenzji rozprawa ma 210 stron.

Wnioskowana dyscyplina naukowa:

**INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA**

## Spis treści

1. Cel pracy .....	4
1.1. Wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata .....	4
2. Przegląd literatury .....	5
2.1. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej .....	5
3. Układ rozprawy doktorskiej .....	8
3.1. Ocena układu rozprawy doktorskiej w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych .....	8
4. Metodologia badań .....	9
4.1. Sposób badań, w tym wybór metod analitycznych i przybliżonych .....	9
5. Podstawy teoretyczne .....	11
5.1. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych .....	11
6. Element nowości naukowej .....	13
7. Wyniki pracy .....	15
7.1. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań .....	15
7.2. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań .....	16
8. Dyskusja i pytania do pracy .....	17
8.1. Dyskusja 1 .....	17
8.2. Pytanie 2 .....	18
8.3. Pytanie 3 .....	18
8.4. Pytanie 4 .....	19
8.5. Pytanie 5 .....	19
8.6. Dyskusja 6 .....	19
8.7. Pytanie 7 .....	19
8.8. Pytanie 8 .....	20
8.9. Pytanie 9 .....	21
8.10. Pytanie 10 .....	22
8.11. Pytanie 11 .....	23
8.12. Pytanie 12 .....	23
8.13. Pytanie 13 .....	24
8.14. Dyskusja 14 .....	24
8.15. Pytanie 15 .....	26
8.16. Pytanie 16 .....	27
8.17. Pytanie 17 .....	27
8.18. Pytanie 18 .....	27
9. Oryginalność pracy i ogólna wiedza teoretyczna kandydata .....	28

9.1.	Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.....	28
9.2.	Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.....	28
10.	Kryteria edytorskie .....	29
11.	Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej.....	31
12.	Podsumowanie, wyróżnienie i wniosek.....	32
12.1.	Wyróżnienie rozprawy.....	33
12.2.	Wniosek .....	34

# 1. Cel pracy

## 1.1. Wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata

W przedłożonej rozprawie doktorskiej zaproponowano następujący cel:

*„Celem rozprawy doktorskiej jest wypracowanie analityczno-aproksymacyjnego podejścia do opracowania modelu matematycznego złożonej instalacji energetycznej na przykładzie bloku gazowo-parowego dla Elektrociepłowni Żerań.”.*

Osiągnięcie celu ma znaczenie m.in. dla diagnostyki oraz predykcji krótko- i długookresowej bloku CCGT wyposażonego w turbinę 701F. Opracowany model zapewnia wyższy poziom precyzji w diagnostyce, umożliwiając szybką identyfikację i rozwiązywanie potencjalnych problemów w jednostce gazowo-parowej w Żeraniu.

Poprzez szczegółową analizę poszczególnych komponentów, model ułatwia dokładną ocenę zarówno tych komponentów, jak i ocenę ogólną sposobu działania bloku gazowo-parowego. Możliwość ta przyczynia się do minimalizacji przestojów i optymalizacji terminów przestojów bloku ze względu na jego konserwację.

Możliwości predykcyjne modelu matematycznego bloku CCGT umożliwiają ocenę zachowania jednostki w różnych scenariuszach uruchamiania mocy bloku na rynku. Ma to kluczowe znaczenie dla procesów decyzyjnych związanych z bieżącym dostosowaniem operacyjnym do aktualnie panujących warunków, jak i planowaniem długoterminowym związanym ze starzeniem się komponentów bloku.

Inną opcją oferowaną przez model jest możliwość sprawdzenia nowych instalacji, których aktualnie nie ma w bloku lub nowych źródeł paliwa.

Pokazany opis modelu ma również cechę uniwersalizmu. Model może być dostosowany do różnych bloków gazowo-parowych, czyniąc go cennym narzędziem dla badaczy i praktyków w energetyce.

## 2. Przegląd literatury

### 2.1. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

W pracy zostało wymienione sto dziewięćdziesiąt źródeł literaturowych, polsko- i anglojęzycznych, z lat 1963 – 2023. Badaną literaturę podzielono na : układy gazowo-parowe, turboszespoły gazowe, kotły odzysknicowe, turboszespoły parowe. Podany spis literatury koncentruje się przede wszystkim na różnych aspektach związanych z turbinami gazowymi, turbinami parowymi, elektrowniami o cyklu kombinowanym, generatorami pary z odzyskiem ciepła (HRSG) i powiązаныmi tematami. Chociaż lista literatury obejmuje szeroki zakres tematów w dziedzinie systemów energetycznych i termodynamiki, nie wspomina wyraźnie o konkretnym temacie "*Analityczno-dokładny model matematyczny bloku gazowo-parowego (CCGT) do celów diagnostycznych i ewaluacyjnych*".

Cytowana literatura obejmuje szeroką gamę tytułów poruszających tematy związane z projektowaniem, optymalizacją, modelowaniem i analizą różnych komponentów i systemów w elektrowniach, w szczególności koncentrując się na blokach gazowo-parowych i elektrowniach o cyklu kombinowanym. Autorzy cytowanej literatury badali różnorodne aspekty inżynierii elektrowni, w tym:

- optymalizację generatorów pary z odzyskiem ciepła (HRSG) w różnych warunkach środowiskowych, takich jak tropikalne lasy deszczowe, oraz metodologie odzyskiwania ciepła odpadowego,
- rozwój i udoskonalanie technologii turbin gazowych, takich jak model M701F5, poprzez integrację zaawansowanych technologii w celu zwiększenia wydajności i elastyczności,
- modelowanie i symulację różnych komponentów, w tym turbin parowych, turbin gazowych i wymienników ciepła, w celu zrozumienia ich dynamicznego zachowania, charakterystyki wydajności i interakcji w systemie elektrowni,
- techniki optymalizacji techniczno - ekonomicznej w celu poprawy wydajności HRSG i elektrowni o cyklu kombinowanym, z uwzględnieniem czynników takich jak punkt przewężenia temperaturowego (pinch point), prędkość po stronie gazowej i parametry operacyjne,
- dokonywali oceny porównawczej różnych systemów wytwarzania energii, takich jak cykle kombinowane i systemy turbin gazowych o różnych konfiguracjach, w celu zidentyfikowania optymalnych projektów i strategii operacyjnych,

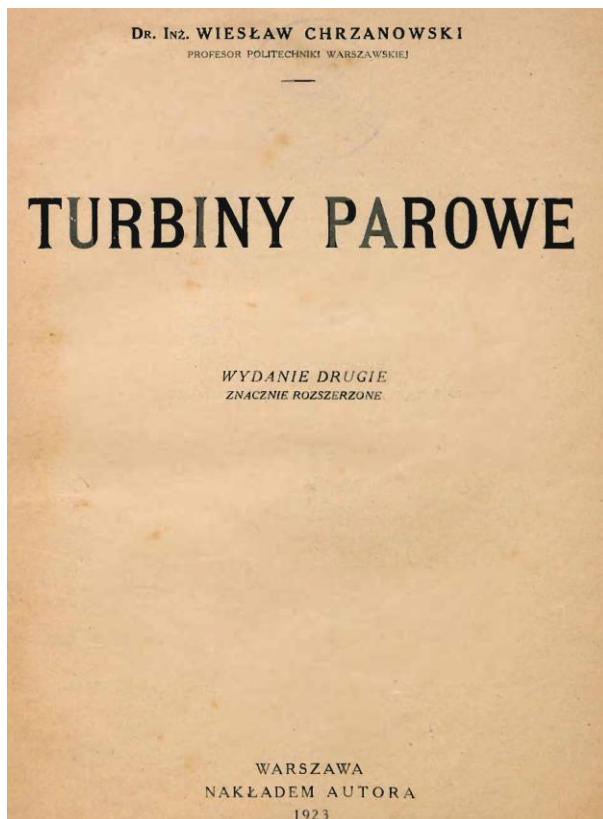
- analizowali pracę turbiny gazowej w układach skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej oraz wpływ czynników takich jak wtrysk pary, wtrysk wody i rekuperację na wydajność.

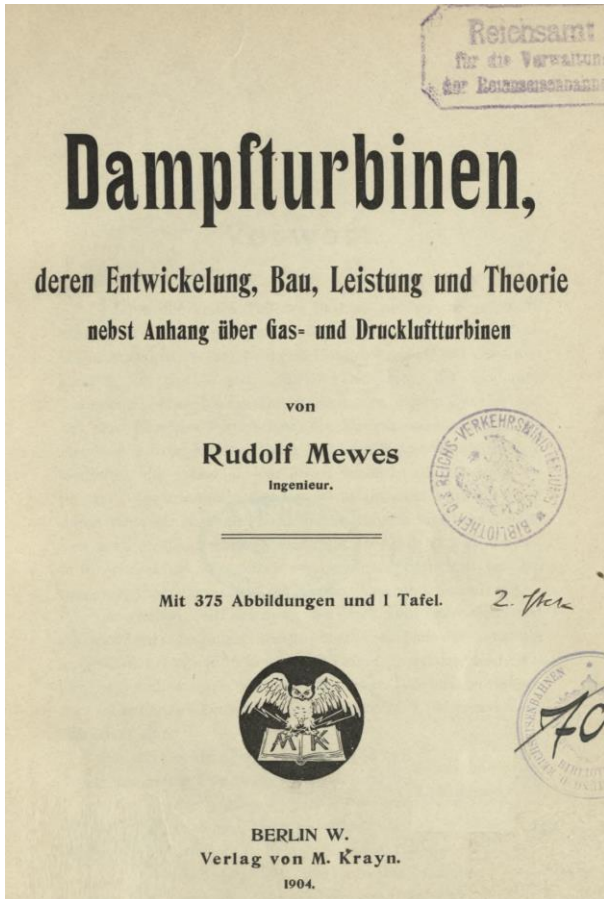
- opracowali i wdrożyli modele matematyczne, narzędzia obliczeniowe i algorytmy optymalizacyjne do projektowania, analizy i optymalizacji komponentów i systemów elektrowni.

Cytowane tytuły wspólnie stanowią kompleksowy przegląd wysiłków badawczych w dziedzinie m.in. bloków CCGT.

Cytowana literatura jest zgodna z tematem rozprawy.

Do pełnego obrazu można dodać kontekst historyczny, pokazujący książki autorów rozwijających dane równania. Praca mogłaby być uzupełniona np. o prace : Aurela Bolesława Stodoli, Dubbela oraz patent związany z turbiną 701F, co pokazano poniżej.





# GASDYNAMIK

VON

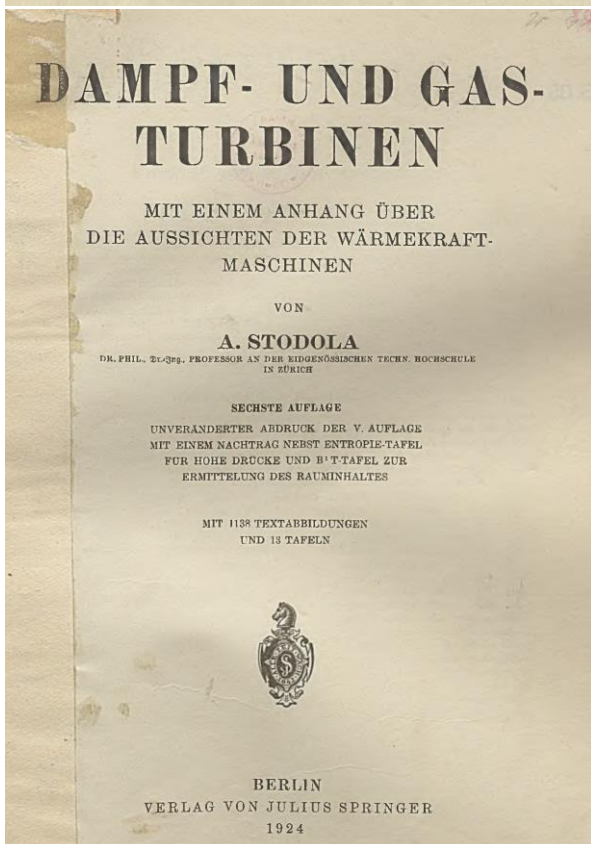
**DR. KLAUS OSWATITSCH**

DOZENT AN DER KÖNIGL. TECHNISCHEN HOCHSCHULE IN STOCKHOLM,  
FRÜHERER WISSENSCHAFTLICHER MITARBEITER AM KAISER-WILHELM-  
(MAX-PLANCK-) INSTITUT FÜR STÖRUNGSPORSCHUNG IN GÖTTINGEN

MIT 300 TEXTABBILDUNGEN UND 3 TAFELN



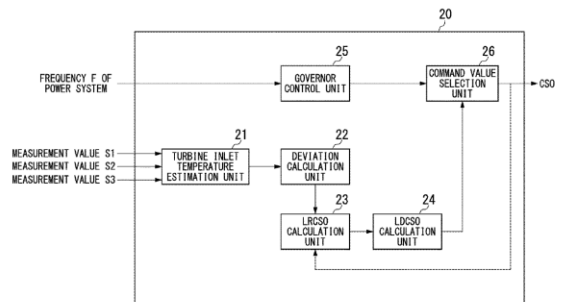
SPRINGER-VERLAG WIEN GMBH



US 2020063662A1

(19) **United States**  
(12) **Patent Application Publication** (10) **Pub. No.: US 2020/0063662 A1**  
**TAKAKI et al.** (43) **Pub. Date: Feb. 27, 2020**

- (54) **GAS TURBINE CONTROL APPARATUS AND GAS TURBINE CONTROL METHOD** (30) **Foreign Application Priority Data**  
Dec. 15, 2016 (JP) ..... 2016-243359
- (71) Applicant: **Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd.**, Kanagawa (JP)
- (72) Inventors: **Kazushige TAKAKI**, Tokyo (JP); **Akihiko SAITO**, Tokyo (JP); **Ryuji TAKENAKA**, Yokohama-shi (JP); **Koshiro FUKUMOTO**, Yokohama-shi (JP); **Tomohide AKIYAMA**, Yokohama-shi (JP); **Kazuhito OHASHI**, Yokohama-shi (JP); **Yoshifumi IWASAKI**, Yokohama-shi (JP)
- (51) **Int. Cl.** **F02C 9/28** (2006.01)  
(52) **U.S. Cl.** **CPC** ..... **F02C 9/28** (2013.01); **F05D 2270/303** (2013.01)
- (57) **ABSTRACT**  
A first fuel flow rate command value indicating a command value CSO of a fuel input amount is calculated so that the output of a gas turbine matches a target output. An upper limit value of the first fuel flow rate command value is calculated. The upper limit value of the first fuel flow rate command value is calculated on the basis of a deviation obtained by subtracting from an estimated value of the turbine inlet temperature of the gas turbine a second limit value relating to the estimated value set such that the estimated value does not exceed the first limit value of the turbine inlet temperature.
- (21) Appl. No.: **16/466,088**  
(22) PCT Filed: **Dec. 15, 2017**  
(86) PCT No.: **PCT/JP2017/045073**  
§ 371 (c)(1),  
(2) Date: **Jun. 3, 2019**



## 3. Układ rozprawy doktorskiej

### 3.1. Ocena układu rozprawy doktorskiej w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

W rozdziale 3. autor omawia tworzenie matematycznych modeli instalacji energetycznych, skupiając się na układach gazowo-parowych. Przegląd literatury ukierunkował dalsze badania, określając poziom szczegółowości i identyfikując zmienne w modelu.

W rozdziale 4. zidentyfikowano czynniki robocze badanego obiegu, a także określono kluczowe właściwości umożliwiające analizę układów cieplno-przepływowych. Wykorzystano równania stanu gazu do rozwinięcia modelu gazu doskonałego i półdoskonałego.

W rozdziale 5. opisano matematyczny model turbozespołu gazowego M701F5, obejmujący różne elementy, takie jak sprężarka osiowa, chłodnica powietrza, komory spalania i turbina gazowa. Model uwzględnia równania bilansowe, zależności empiryczne i algorytmy sterownika.

W rozdziale 6. skupiono się na modelowaniu matematycznym kotła odzysknicowego, uwzględniając podgrzewacze, parowniki, walczaki i inne elementy. Model uwzględnia także wymienniki ciepła, bazujące na analityczno-empirycznym modelu wymiany ciepła.

W rozdziale 7. przedstawiono model matematyczny turbozespołu parowego DST-S10 i związane z nim układy. Model obejmuje modele cząstkowe i opiera się na analityczno-empirycznym modelu wymiany ciepła.

W rozdziale 8. przeprowadzono weryfikację modeli matematycznych. Przedstawiono charakterystyki pracy układu na podstawie zaimplementowanego modelu obliczeniowego.

Rozdział 9. to podsumowanie, prezentujące główne rezultaty konstrukcji modelu matematycznego. Wnioski uwzględniają obszary potencjalnych korzyści dla Spółki wynikających z wdrożenia proponowanego narzędzia.

Struktura rozdziałów jest zgodna z tematem, celem i treścią rozprawy doktorskiej.



## 4. Metodologia badań

### 4.1. Sposób badań, w tym wybór metod analitycznych i przybliżonych

Metodologia badań przedstawionych w pracy opiera się na analizie, identyfikacji, modelowaniu matematycznym, a także weryfikacji uzyskanych wyników przy użyciu własnego programu komputerowego. Adekwatność metodologii została oceniona w kontekście zdefiniowanych celów badawczych i istotności uzyskanych wyników. W pracy wykorzystano zarówno podejścia analityczne, jak i empiryczne, co pozwala na uzyskanie pełniejszego obrazu działania analizowanych układów gazowo-parowych. Pracę rozpoczęto od zdefiniowania problemu badawczego oraz celów pracy : *„Celem rozprawy doktorskiej jest wypracowanie analityczno-aproksymacyjnego podejścia do opracowania modelu matematycznego złożonej instalacji energetycznej na przykładzie bloku gazowo-parowego dla Elektrociepłowni Żerań.”*. Dokonano przeglądu literatury w celu zaznajomienia się z istniejącymi modelami i metodami. Przeprowadzono identyfikację i analizę czynników roboczych, takich jak powietrze atmosferyczne, gaz ziemny wysokometanowy, gazy spalinowe, woda, i para wodna. Przedstawiony w pracy analityczno-aproksymacyjny model matematyczny bloku gazowo-parowego w Elektrociepłowni Żerań zawiera modele cząstkowe kolejnych elementów układu technologicznego analizowanej jednostki, w szczególności: turbozespołu gazowego M701F5, trójprężnego kotła odzysknicowego CMI z układem przegrzewu wtórnego, turbozespołu parowego upustowo-ciepłowniczego DST-S10. Czynniki robocze uwzględnione w modelu to powietrze atmosferyczne, gaz ziemny wysokometanowy, gazy spalinowe, woda i para wodna, a opracowane biblioteki własności termodynamicznych i transportowych (m.in. IAPWS) obejmują istotne parametry tych czynników. W modelu zostały zastosowane równania stanu gazu w formie proponowanej przez Redlicha-Kwonga, Soave-Redlicha-Kwonga, Penga-Robinsona i Lee-Keslera.

Zrobiono identyfikację układu turbozespołu gazowego M701F5. Opisano poszczególne elementy turbozespołu gazowego, takie jak zespół filtrów wlotowych, kierownicę wlotową IGW, sprężarkę osiową, chłodnicę powietrza TCA, układ paliwa gazowego, zespół komór spalania, linia ekspansji gazów spalinowych, charakterystyki sprężarki osiowej itp. Model matematyczny turbozespołu gazowego obejmuje zarówno modele cząstkowe poszczególnych komponentów, jak i równania bilansowe masy i energii.

Charakterystyki przepływowe i sprawnościowe sprężarki osiowej zostały opisane rodzinami funkcji liniowych i wielomianowych, uwzględniając zmienne warunki otoczenia, zwłaszcza wpływ temperatury powietrza zewnętrznego.

Przeprowadzono identyfikację układu kotła odzysknicowego. Opisano poszczególne elementy kotła odzysknicowego, takie jak podgrzewacz wody zasilającej, parownik, walczak, przegrzewacz pary, ekonomizer podgrzewu wody sieciowej, ekonomizer podgrzewu paliwa gazowego itp. Wymianę ciepła w układzie kotła odzysknicowego opisano za pomocą teoretyczno-empirycznego modelu, uwzględniając zmienne warunki pracy kotła. Wykorzystano przy tym analizę wymiarową do uzyskania własnych postaci równań opisujących zmianę mocy ciepłej wymienników na 1°C (np. równania 5.35, 5.51 i 5.56).

Dokonano identyfikacji układu turbozespołu parowego poprzez analizę poszczególnych grup stopni turbinowych, stacji redukcyjno-schładzającej, wymiennika podturbinowego i ciepłowniczego, wymiennika pseudokondensacji itp. Przeprowadzono bilans mocy na wale dla turbozespołu parowego. W modelu linii ekspansji spalin w turbozespole parowym DST-S10 zastosowano równanie przelotności Stodoli-Flügela, a parametry kondensacji w wymiennikach ciepłowniczych zostały wyznaczone na podstawie własnych modeli teoretyczno-empirycznych autora. Model linii ekspansji w turbozespole parowym uwzględnia sześć grup stopni turbinowych, do którego zastosowano równanie przelotności Stodoli-Flügela i zależności empiryczne.

W rozdziale opisującym wyniki przedstawiono opis opracowanego programu komputerowego na podstawie zbudowanego modelu matematycznego. Przeprowadzono weryfikację modelu matematycznego przy użyciu dostępnych danych pomiarowych z pierwszego roku pracy nowego bloku na Żeraniu. Dane obejmowały 309 sygnałów i 45 515 wartości. Zaprezentowano wybrane charakterystyki turbozespołu gazowego, kotła odzysknicowego i turbozespołu parowego oraz wyniki uzyskane z modelu. Program komputerowy oparty na tym modelu znajduje zastosowanie w PGNiG TERMIKA SA do planowania pracy bloku gazowo-parowego. Realizacja modelu matematycznego ma zastosowanie praktyczne w bieżącej pracy operatorskiej i diagnostyce układów cieplno-przepływowych bloku gazowo-parowego.

Pracę zakończono podsumowaniem uzyskanych wyników, wnioskami i sugestiami na przyszłe badania.

Podsumowując, metodologia badań została starannie opracowana w celu kompleksowego zbadania modelu elektrowni gazowo-parowej, a analityczne i przybliżone metody modelowania jednostek CCGT zostały szczegółowo wyjaśnione w rozdziałach 5-7 oraz załączniku.

## 5. Podstawy teoretyczne

### 5.1. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

Rozdziały 5-7 poświęcono ramom teoretycznym modelowania bloku gazowo - parowego zagłębiając się w podstawowe zasady identyfikacji i termodynamiki tworzące analityczno-aproksymacyjny model matematyczny bloku. Autor wykonał skomplikowaną pracę polegającą z jednej strony na zebraniu szczegółowych danych technicznych dotyczących turbiny oraz układu bloku, a z drugiej strony na ich opisanu od strony modelu matematycznego mającego kompletny zestaw równań od wlotu powietrza aż do wylotu ciepła i energii elektrycznej.

Kluczowe koncepcje, założenia i zasady, które stanowią podstawę modelu oparto o termodynamikę obiegów gazowych oraz parowych uzupełnioną o elementy identyfikacji systemów. W rozważaniach wykorzystywano równania bilansu ciepła po dwóch stronach różnego rodzaju wymienników występujących w bloku gazowo-parowym (np. 5.48, 5.49) wraz z równaniem zawierającym logarytmiczną różnicę temperatur (np. 5.50). W celu wychwycenia poza-nominalnych stanów statycznych pracy bloku wykorzystywano analizę wymiarową wykorzystującą współczynnik lepkości, współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe oraz strumienie masy po obu stronach wymiennika. Nieznane współczynniki wymiarowej zależności empirycznej były ustalane na podstawie danych pomiarowych poprzez minimalizację odpowiedzi modelu oraz odpowiedzi obiektu wziętej z danych pomiarowych. Podejście to dotyczyło układu paliwa gazowego, chłodnicy powietrza chłodzącego, wymiennika pseudokondensacji, podgrzewacza wody zasilającej, wewnętrznych wymienników zawartych w kotle odzyskicowym. Ponadto w przypadku kotła odzyskicowego wykorzystano zależność Dittusa-Boeltera do określenia współczynnika przejmowania ciepła.

Z bilansów masy lub też energii wyznaczono strumienie masy powietrza np. chłodzącego łopatkę turbiny oraz określono zależność strumienia objętości powietrza w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego oraz stopnia otwarcia kierownicy powietrza wlotowego (równanie 6.7, rys. 5.9). Zaproponowano własny sposób określenia linii sprężania w sprężarce tj. entropii, ciśnienia i temperatury za poszczególnymi stopniami sprężarki powietrza wlotowego (równanie 5.10 i dalsze).

W różnych analizach opisujących strumienie masowe wykorzystywano równanie przelotności opracowane przez Stodolę i wyprowadzone przez Flügela (np. równania 5.20, 5.28). Dotyczy to grup stopni turbinowych oraz turbozespołu parowego. W niektórych przypadkach autor proponował własne wersje równania Stodoli-Flügela (5.96-5.98) polegające na wprowadzeniu różnych dodatkowych zabiegów

matematycznych wychodzących poza oryginalne wyprowadzenia. Uzasadnieniem było lepsze odwzorowanie danych pomiarowych.

Wyznaczono przykładowe zależności pomiędzy sprężem w sprężarce oraz zredukowanym strumieniem masowym powietrza wlotowego do sprężarki.

W modelu zawarto również ograniczenia definiowane m.in. przez temperaturę gazów wylotowych, blok ograniczeń termicznych, otwarcia kierownicy powietrza wlotowego IGV ,

Model umożliwia wyznaczenie ciśnień, entropii, entalpii, strumieni masy oraz mocy i sprawności, a także strumieni powietrza, paliwa w różnych punktach układu bloku. Jest to model o danych i zmiennych skupionych.

Wybrana metoda badawcza w oparciu o elementy mechaniki płynów, termodynamiki, identyfikacji i sterowania jest jedną z możliwych metod prowadzących do prawidłowych wyników.

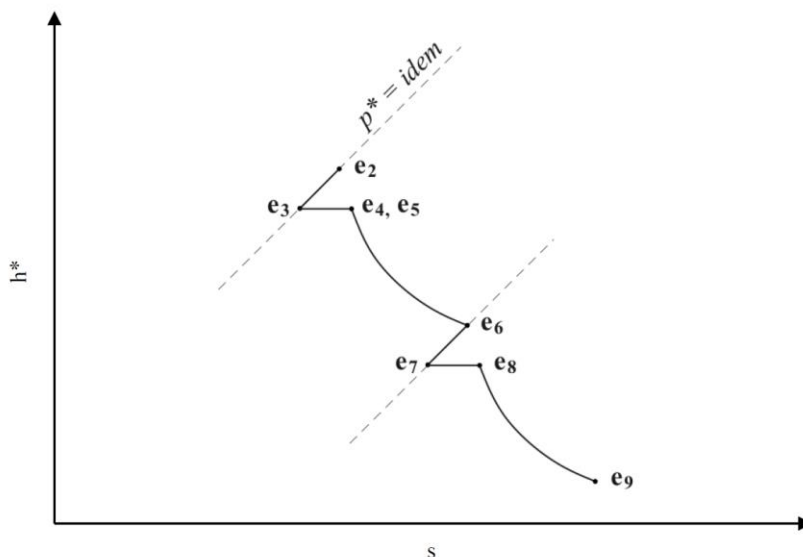
## 6. Element nowości naukowej

Cytowana przez autora rozprawy literatura nie wspomina wyraźnie o konkretnym temacie "Analityczno-dokładny model matematyczny bloku gazowo-parowego (CCGT) do celów diagnostycznych i ewaluacyjnych".

Jako element nowości można wyróżnić opracowany przez autora model linii ekspansji spalin wewnątrz turbiny gazowej oraz własne równania identyfikacyjne związane z turbiną 701F.

Opracowano własny model linii ekspansji gazów spalinowych i zaproponowano nową metodę wyznaczania mocy teoretycznej i sprawności wewnętrznej dla stopni turbinowych z otwartymi układami chłodzenia. Szczególnym aspektem modelu jest odwzorowanie bloku ograniczeń

dwoma wskazanymi etapami ekspansji gazów spalinowych. Chłodzenie z wykorzystaniem metody filmu powietrznego jest procesem ciągłym, zachodzącym wzdłuż profilu łopatki. Powietrze chłodzące wypływa w poszczególnych przekrojach stopniowo mieszając się z gazami spalinowymi. Rozdział całkowitego strumienia czynnika chłodzącego koresponduje więc z rzeczywistym przebiegiem zjawiska. Straty ciśnienia i temperatury dla rozważanego wieńca wirującego umiejscowiono na drodze ekspansji, co pozwala na pewne uśrednienie wyznaczanych wielkości w stosunku do całego wieńca. Przebieg linii ekspansji dla pierwszego stopnia turbinowego przedstawiono na Rys. 5.19.



Rysunek 5.19: Przebieg linii ekspansji dla pierwszego stopnia turbinowego.

W opracowanym modelu matematycznym linii ekspansji połączono zalety dwóch głównych koncepcji wskazanych powyżej. Wieńce kierowniczy i wirujący każdego stopnia turbinowego rozpatrywano osobno. Założono, że praca wykonywana przez czynnik roboczy wzdłuż profilu przepływowego stopnia turbinowego ma charakter dyskretny i zachodzi jedynie w wieńcach wirujących maszyny. Określono wielkości strat ciśnienia i temperatury wynikających z mieszania gazów spalinowych i powietrza chłodzącego. Proponowana koncepcja charakteryzuje się reorganizacją porządku kolejnych przemian termodynamicznych

---

dla wieńców turbinowych chłodzonych metodą filmu powietrznego. Uproszczony schemat zastępczy części ekspansyjnej turbozespołu gazowego przedstawiono na Rys. 5.20.

## 7. Wyniki pracy

### 7.1. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

W pracy przedstawiono

1) charakterystyki turbosespołu gazowego:

- sprawność elektryczną turbosespołu gazowego w funkcji obciążenia i temperatury powietrza zewnętrznego,
- moc paliwa gazowego w funkcji obciążenia turbosespołu gazowego i temperatury powietrza zewnętrznego,
- obciążenie turbosespołu gazowego w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego,
- temperaturę wylotową spalin dla maksymalnego obciążenia turbosespołu gazowego w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego,

2) charakterystyki kotła odzysknicowego:

- natężenie przepływu pary wysokoprężnej, wtórnie przegrzanej i niskoprężnej w funkcji obciążenia turbosespołu gazowego,

3) charakterystyki turbosespołu parowego:

- moc elektryczną turbosespołu parowego w funkcji temperatury wody sieciowej i natężenia przepływu pary technologicznej,
- ciśnienie kondensacji w wymiennikach podturbinowym DWH1 i ciepłowniczym DWH2 w funkcji temperatury wody sieciowej i natężenia przepływu pary technologicznej,

4) charakterystyki bloku

- obszar możliwej eksploatacji bloku gazowo-parowego w sezonie zimowym oraz letnim,
- osiągalne obciążenie bloku gazowo-parowego w funkcji natężenia przepływu i temperatury pobieranej wody chłodzącej.

Tym samym zrealizowano założony cel pracy. Wyniki są jakościowo prawidłowe.

## 7.2. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Narzędzie programistyczne oparte o model matematyczny bloku CCGT zostało przetestowane i wdrożone w Termice.

Szczególnym wynikiem niniejszej pracy jest zrealizowanie zagadnienia istotnego dla praktyki przemysłowej. Program komputerowy zaimplementowany na podstawie opracowanego modelu matematycznego jest w trakcie wdrażania w PGNiG TERMIKA SA. Aplikacja zgodnie z przyjętym celem będzie wykorzystana jako narzędzie wspomagające

170

planowanie pracy bloku gazowo-parowego w perspektywie krótko- i długookresowej, co jest zadaniem priorytetowym z uwagi na dynamicznie zmieniającą się sytuację ekonomiczną. Program komputerowy pozwala na badanie właściwości nowego obiektu w funkcji zmieniających się warunków otoczenia i powiązań technologicznych z częścią kolektorową zakładu żerańskiego. Opracowane narzędzie umożliwia porównywanie osiągnięć bloku energetycznego w zależności od konfiguracji pracy układu wody sieciowej (tryb ciepłowniczy, pseudokondensacji i mieszany) oraz układu zasilania pary technologicznej dla odbiorców zewnętrznych. Ważnym aspektem wykorzystania modelu jest możliwość wyznaczania maksymalnego obciążenia bloku gazowo-parowego w funkcji temperatury i dostępności wody chłodzącej oraz aktywacji BOT turbozespołu gazowego. Program obliczeniowy powinien znaleźć zastosowanie nie tylko w obszarach działalności Spółki, które związane są z koordynacją i prognozowaniem możliwości produkcyjnych energii elektrycznej i ciepła, ale także planowaniem zakupów paliwa i uprawnień do emisji dwutlenku węgla. Wizualizacja parametrów termodynamicznych czynnika roboczego w punktach charakterystycznych pozwala na bieżącą ocenę stanu technicznego maszyn i urządzeń.



## 8. Dyskusja i pytania do pracy

### 8.1. Dyskusja 1

Strumień powietrza recykulowanego z wylotu sprężarki osiowej na potrzeby układu przeciwooblodzeniowego wyznaczono na podstawie bilansu cieplno-przepływowego (5.3).

$$\dot{m}_{a16} = \dot{m}_{a0} \frac{h_{a1} - h_{a0}}{h_{a16} - h_{a1}} \quad (5.3)$$

Warto zauważyć, że równanie (5.3) może przyjąć postać wynikającą z przyjętego sposobu sterowania systemem antyoblodzeniowym

$$\dot{m}_{a16} = \dot{m}_{a0} \frac{h_{a1} - h_{a0}}{h_{a16} - h_{a1}} = \dot{m}_{a0} \frac{h_{a0}(T_{a0} + 4) - h_{a0}(T_{a0})}{h_{a16} - h_{a0}(T_{a0} + 4)}$$

I dalej być rozwiązane i uproszczone w oparciu o dwukrotnie zastosowany wzór na entalpię powietrza ( $t$ -temperatura,  $x$  – stopień zwilżenia powietrza):

$$h = 1.01t + x(2501 + 1.86t) , \text{ kJ/kg}$$

jako

$$\begin{aligned} \dot{m}_{a16} &= \dot{m}_{a0} \frac{h_{a0}(T_{a0} + 4) - h_{a0}(T_{a0})}{h_{a16} - h_{a0}(T_{a0} + 4)} \\ &= \dot{m}_{a0} \frac{1.01(t + 4) + x(2501 + 1.86(t + 4)) - 1.01t - x(2501 + 1.86t)}{h_{a16} - h_{a0}(T_{a0} + 4)} \\ &= \dot{m}_{a0} \frac{4.04 + 7.44x}{h_{a16} - h_{a0}(T_{a0} + 4)} \end{aligned}$$

## 8.2. Pytanie 2

Ciśnienie wlotowe do układu sprężarki osiowej zapisano z wykorzystaniem wskazanej zależności w postaci (5.4).

$$p_{a2} = p_{a1} - k_0 \frac{\dot{m}_{a1}^2}{\rho_{a1}} \quad (5.4)$$

Wartość parametru w równaniu (5.4), wynikającą z geometrii układu i współczynnika oporu, założono jako stałą i wyznaczono rozwiązując zagadnienie zdefiniowane względem ciśnienia wlotowego do układu przepływowego sprężarki osiowej jako (5.5). Podsumowanie

Skoro współczynnik  $k_0$  jest stały, to jaki jest zakres liczby Reynoldsa  $Re$ ? W równaniu D'Arcy'ego -Weisbacha  $\lambda = f(Re, k)$ . Szczegóły poniżej.

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = \Delta h = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = \left( \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{\dot{m}^2}{\rho^2 2gA} = \left( \frac{1}{2} \lambda \frac{l}{d} \frac{1}{A} \right) \frac{\dot{m}^2}{\rho^2 g} = \frac{1}{\rho g} k_0 \frac{\dot{m}^2}{\rho}$$

## 8.3. Pytanie 3

Ciśnienie wlotowe do układu sprężarki osiowej zapisano z wykorzystaniem wskazanej zależności w postaci (5.4).

$$p_{a2} = p_{a1} - k_0 \frac{\dot{m}_{a1}^2}{\rho_{a1}} \quad (5.4)$$

Wartość parametru w równaniu (5.4), wynikającą z geometrii układu i współczynnika oporu, założono jako stałą i wyznaczono rozwiązując zagadnienie zdefiniowane względem ciśnienia wlotowego do układu przepływowego sprężarki osiowej jako (5.5). Podsumowanie osiągniętych wyników ujęto w Tab. 5.3. Pozostałe parametry termodynamiczne powietrza za zespołem filtrów wlotowych wyznaczono w oparciu o zestaw zależności opisujących zjawisko dławienia izentalpowego [145].

$$\sum (p_{a2dane} - p_{a2model})^2 \rightarrow \min \quad (5.5)$$

Tabela 5.3: Podsumowanie wyników dla równania modelowego uwzględniającego spadek ciśnienia w kanale wlotowym sprężarki osiowej.

Równanie modelowe	$p_{a1} = p_{a0} - 4.664 \frac{\dot{m}_{a0}^2}{\rho_{a0}} \cdot 10^{-4}$
Współczynnik determinacji $R^2$	99.78%
Średni błąd bezwzględny $MAE$	$3.69 \cdot 10^{-5}$ MPa
Średni błąd względny $MRE$	0.04%

Tekst dotyczy punktów a2-a1. Tymczasem w tabeli jest a1-a0. Proszę o komentarz.

#### 8.4. Pytanie 4

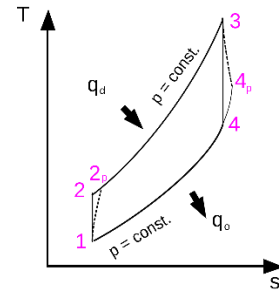
$$\sum (\dot{V}_{a2dane} - \dot{V}_{a2model})^2 \rightarrow \min \quad (5.7)$$

Jak rozumieć jest pomiar strumienia powietrza na wlocie do turbiny M701F5 ?

#### 8.5. Pytanie 5

Opracowany algorytm iteracyjny wyznacza całkowity wzrost entropii właściwej powietrza w układzie przepływowym sprężarki osiowej (5.9). Rozkład wzrostu entropii właściwej powietrza dla poszczególnych grup przyjęto proporcjonalnie względem liczby stopni sprężarkowych wchodzących w skład każdej grupy.

$$\Delta s = s_{a9} - s_{a2} \quad (5.9)$$



Parametry termodynamiczne powietrza za pierwszą grupą stopni sprężarkowych wyznaczano w oparciu o zestaw równań (5.10), (5.11), (5.12). Ciśnienie w analizowanym punkcie bilansowym założono proporcjonalnie względem liczby stopni i ciśnienia w przekroju wylotowym (5.11).

Pewnie to jest „rozsądne” założenie – model liniowy. Ale nie ma pewności, że tak jest. Czy ciepło  $dQ = Tds$  będzie odbierane proporcjonalnie przy stopniach o różnych geometriach ? Jak widać z rysunku T zmienia się nieliniowo w funkcji s.

#### 8.6. Dyskusja 6

Parametry termodynamiczne powietrza za drugą grupą stopni sprężarkowych wyznaczano w oparciu o zestaw równań (5.13), (5.14), (5.15). Temperaturę czynnika roboczego w analizowanym punkcie bilansowym ustalono za pomocą zależności empirycznej (5.14) względem temperatury powietrza za układem przepływowym sprężarki.

$$s_{a6} = s_{a5} + \frac{4}{17} \Delta s \quad (5.13)$$

Do pełności modelu brakuje równania  $s_5 = s_3$ , co jest jakby w domyśle z idei podziału ds. na 17 stopni.

#### 8.7. Pytanie 7

$$T_{a6} = k_0 T_{a9} + k_1 \quad (5.14)$$

Cofamy się z temperaturą za sprężarką np. 300 °C (?) w dół. 1.3\*150 °C – 260 = -65 °C tj. za sprężarką musi być np. 400 °C. A nie dało się cofnąć po politropie ?

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

### 8.8. Pytanie 8

Z czego wynika zmienność zasady proporcjonalności?

wyznaczano w oparciu o zestaw równań (5.10), (5.11), (5.12). Ciśnienie w analizowanym punkcie bilansowym założono proporcjonalnie względem liczby stopni i ciśnienia w przekroju wylotowym (5.11).

$$s_{a3} = s_{a2} + \frac{10}{17} \Delta s \quad (5.10)$$

$$p_{a3} = \frac{10}{17} p_{a9} \quad (5.11)$$

$$s_{a6} = s_{a5} + \frac{4}{17} \Delta s \quad (5.13)$$

$$s_{a9} = s_{a8} + \frac{3}{17} \Delta s \quad (5.17)$$

$$p_{a9} = f(\dot{m}_{a2}, p_{a2}, T_{a2}) \quad (5.18)$$

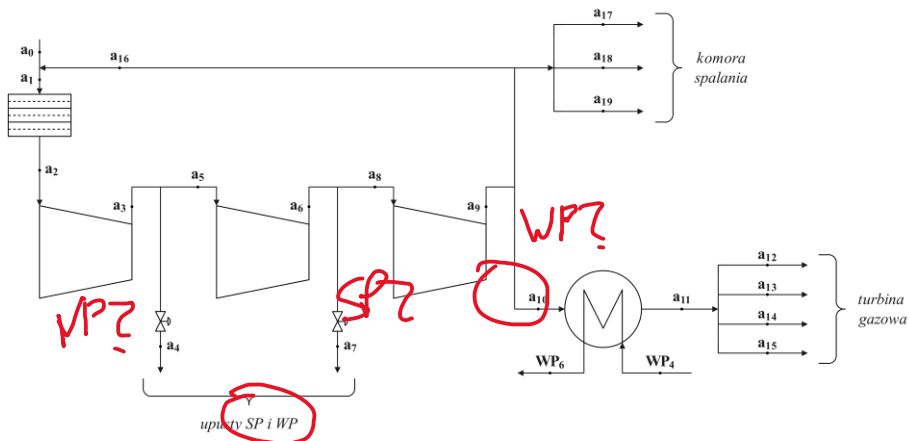
$$T_{a9} = T(p_{a9}, s_{a9}) \quad (5.19)$$

W (5.10) s i p proporcjonalne do liczby stopni, w (5.13) tylko s proporcjonalne do liczby stopni.

W (5.17) tylko s jest proporcjonalne do liczby stopni, a nie p ?

## 8.9. Pytanie 9

Czy prawidłowo oznaczono upusty jako SP i WP ?

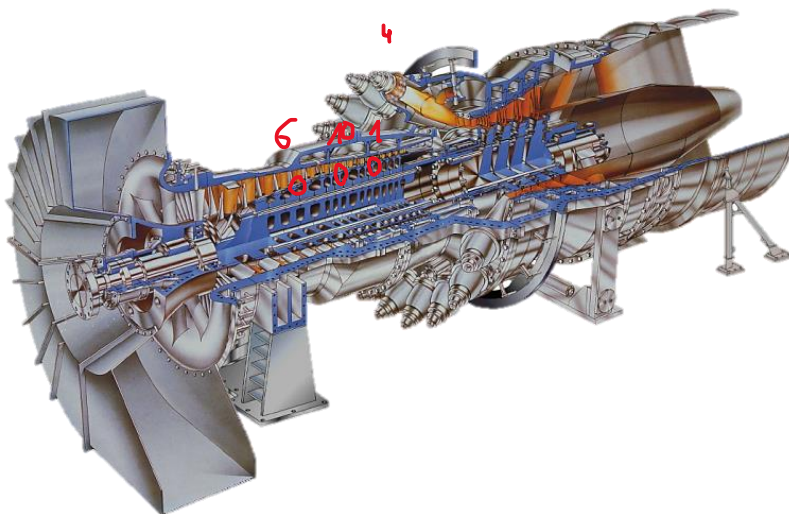


Sprężarka osiowa analizowanego turboszczepu gazowego M701F5 wyposażona jest w trzy upusty powietrza. Powietrze pobierane z upustu niskoprężnego, który zlokalizowany jest za 6. stopniem sprężarkowym, wykorzystywane jest przede wszystkim do uszczelniania łożysk maszyny i chłodzenia aparatury kontrolno-pomiarowej w obrębie turboszczepu gazowego. Natężenie przepływu, które wynika z gospodarki powietrzem na wskazane powyżej cele, jest pomijalne w stosunku do strumienia wlotowego. Przykładowo w celu uszczelnienia jednej

45

komory łożyskowej wymagany przepływ powietrza wynosi około 0.02 kg/s [178]. Pobór powietrza z upustu niskoprężnego nie został uwzględniony w tworzonym modelu matematycznym sprężarki osiowej.

Drugi i trzeci upust powietrza umiejscowione są kolejno za 10. i 14. stopniem sprężarkowym. Powietrze pobierane z upustów średnio- i wysokoprężnego wykorzystywane



## 8.10. Pytanie 10

jest poprzez otwarcie zaworów regulacyjnych. Jednocześnie przyjęto, że wpływ ich otwarcia na natężenie przepływu czynnika roboczego ma charakter liniowy (5.20), (5.21).

$$\dot{m}_{a4} = k_0 \left( k_1 \frac{p_{a9}}{\sqrt{T_{a9}}} + 1 \right) (k_2 z_{a4} + 1) \quad (5.20)$$

$$\dot{m}_{a7} = k_0 \left( k_1 \frac{p_{a9}}{\sqrt{T_{a9}}} + 1 \right) (k_2 z_{a7} + 1) \quad (5.21)$$

jest poprzez otwarcie zaworów regulacyjnych. Jednocześnie przyjęto, że wpływ ich otwarcia na natężenie przepływu czynnika roboczego ma charakter liniowy (5.20), (5.21).

$$\dot{m}_{a4} = k_0 \left( k_1 \frac{p_{a9}}{\sqrt{T_{a9}}} + 1 \right) (k_2 z_{a4} + 1) \quad (5.20)$$

$$\dot{m}_{a7} = k_0 \left( k_1 \frac{p_{a9}}{\sqrt{T_{a9}}} + 1 \right) (k_2 z_{a7} + 1) \quad (5.21)$$

$$\dot{m}_{a4} = k_0 \left( k_1 \frac{p_{a9}}{\sqrt{T_{a9}}} + 1 \right) (k_2 z_{a4} + 1)$$

Czy charakterystyka przepływowa zaworów jest liniowa, czy stałoprocentowa, czy też inna? Czy to sprawdzono ?

Mnożnik  $(k_2 z_{a4} + 1)$  pełni rolę modyfikacji strumienia 0...100% kg/s ograniczając od dołu strumień  $\dot{m}_4$  przy  $z=0\%$  ? Mnożnik pełni rolę modyfikacji strumienia 0...100% kg/s. Dlaczego zdecydowano się na dodanie 1 do równania zamiast np. tylko mnożnika  $k_2 z_{a4}$  ? Ta 1-ka blokuje strumienie = 0 i zawsze daje jakiś strumień minimalny (min F) wynikający z prawa Stodoli-Fluegla. Czy tak jest ?

Czy nie warto pozbyć się współczynnika np.  $k_0$  tworząc dwa współczynniki do wyznaczania zamiast trzech jak np. w równaniu 5.28 ? Choć równanie Aurela Bolesława Stodoli oraz Flügela

$$\frac{m}{m_o} = \frac{\mu}{\mu_o} \frac{p_\alpha}{p_{\alpha o}} \sqrt{\frac{p_{\alpha o} v_{\alpha o}}{p_\alpha v_\alpha}} \sqrt{\frac{1 - (p_{\omega o}/p_\alpha)^{\frac{n+1}{n}}}{1 - (p_{\omega o}/p_{\alpha o})^{\frac{n+1}{n}}}}$$

$$\frac{m}{m_o} = \sqrt{\frac{T_{\alpha o}}{T_\alpha}} \frac{p_\alpha}{p_{\alpha o}} \sqrt{\frac{1 - (p_{\omega o}/p_\alpha)^2}{1 - (p_{\omega o}/p_{\alpha o})^2}} \approx 1$$

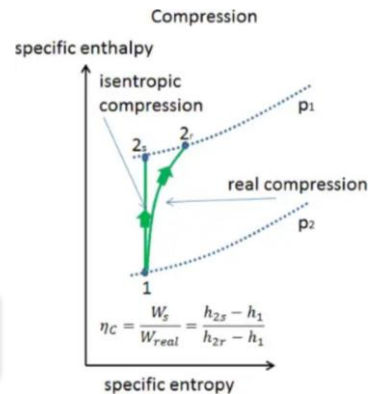
c b n s t

$\alpha$  – wlot,  $\Omega$  – wylot, 0 – stan odniesienia np. projektowy

sugeruje tylko jeden współczynnik .

### 8.11. Pytanie 11

$$(N_{spr})_t = \sum_{i=2,5,8} \dot{m}_{a_i} [h(p_{a_{i+1}}, s_{a_i}) - h_{a_i}] \quad (5.25)$$



Dlaczego  $\dot{m}_{a_i}$ ,  $p_{a_{i+1}}$ ,  $s_{a_i}$  tj. strumień masy, ciśnienie i entropia nie odwołują się do tego samego punktu i? Dlatego, że dla procesu idealnego  $s=s$ , ale ciśnienie  $p$  się zmieniło?

### 8.12. Pytanie 12

Iloczyn współczynnika i powierzchni wymiany ciepła wyznaczano zgodnie z zależnością empiryczną (5.35). Lepkość dynamiczną, przewodność cieplną i ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu uśredniano względem końców wymiennika ciepła. Parametry nominalne ustalono jako wartości uśrednione dla dostępnego zbioru danych bilansowych.

$$\left( \frac{U \cdot A}{U_{nom} \cdot A} \right)_{TCA} = \left( \frac{\mu_a}{\mu_{a,nom}} \right)^{k_1} \left( \frac{\lambda_a}{\lambda_{a,nom}} \right)^{k_2} \left( \frac{c_{p_a}}{c_{p_{a,nom}}} \right)^{k_3} \left( \frac{\dot{m}_{a10}}{\dot{m}_{a10,nom}} \right)^{k_4} \left( \frac{\dot{m}_{WP4}}{\dot{m}_{WP4,nom}} \right)^{k_5} \quad (5.35)$$

W równaniu występuje zależność funkcyjna względem parametrów powietrza (a) oraz pojedyncza zmienna zależna od parametru wody (WP4). Czy wpływ  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $c_p$  wody jest istotny, czy też nie?

Czy

$$\left( \frac{\mu_{wody}}{\mu_{wody,nom}} \right)^{k_4} \left( \frac{\lambda_{wody}}{\lambda_{wody,nom}} \right)^{k_5} \left( \frac{c_{p_{wody}}}{c_{p_{wody,nom}}} \right)^{k_6}$$

jest prawie równe 1 przy tej zmienności temperatur? Albo różnica wynosi np. 5%? Proszę o komentarz.

Podobnie z pozostałymi równaniami tego typu.

$$\left( \frac{U \cdot A}{U_{nom} \cdot A} \right)_{EKT} = \left( \frac{\mu_f}{\mu_{f,nom}} \right)^{k_1} \left( \frac{\lambda_f}{\lambda_{f,nom}} \right)^{k_2} \left( \frac{c_{p_f}}{c_{p_{f,nom}}} \right)^{k_3} \left( \frac{\dot{m}_{f1}}{\dot{m}_{f1,nom}} \right)^{k_4} \left( \frac{\dot{m}_{h0}}{\dot{m}_{h0,nom}} \right)^{k_5} \quad (5.51)$$

$$\left( \frac{U \cdot A}{U_{nom} \cdot A} \right)_{EKC} = \left( \frac{\mu_f}{\mu_{f,nom}} \right)^{k_1} \left( \frac{\lambda_f}{\lambda_{f,nom}} \right)^{k_2} \left( \frac{c_{p_f}}{c_{p_{f,nom}}} \right)^{k_3} \left( \frac{\dot{m}_{f4}}{\dot{m}_{f4,nom}} \right)^{k_4} \left( \frac{\dot{m}_{SP5}}{\dot{m}_{SP5,nom}} \right)^{k_5} \quad (5.56)$$

I dalsze (równania 6.12-6.15).

### 8.13. Pytanie 13

Do najważniejszych parametrów zredukowanych należy zaliczyć:

a) spręż zredukowany,

$$\pi_{red} = \frac{\pi}{\pi_{nom}} \quad (5.37)$$

Według spisu oznaczeń:  $p$  – ciśnienie,  $\pi$  – spręż. Czy nie lepiej użyć jako oznaczeń  $np$ ,  $p/p_{nom}$  ?

### 8.14. Dyskusja 14

Zredukowany przepływ masowy definicyjnie

$$\varphi_{red} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{nom}} \frac{p_{nom}}{p} \sqrt{\frac{T}{T_{nom}}}$$

wynika z równania Stodoli-Flügela po jego przekształceniu

$$\frac{m}{m_o} = \sqrt{\frac{T_{\alpha o}}{T_{\alpha}}} \frac{p_{\alpha}}{p_{\alpha o}} \sqrt{\frac{1 - (p_{\omega}/p_{\alpha})^2}{1 - (p_{\omega o}/p_{\alpha o})^2}}$$

Ponadto zredukowaną prędkość obrotową oraz zredukowany strumień masy można wyznaczyć z zależności (np. Krzysztof Kawalec, Badania sprężarek silników turbinowych, PRACE INSTYTUTU LOTNICTWA 213, s. 142-147, Warszawa 2011)

$$\bar{n}_{zr} = \bar{n} \sqrt{\frac{288.15}{T_{c1}}}; \quad \dot{m}_{zr} = \dot{m} \frac{101325}{p_{c1}} \sqrt{\frac{T_{c1}}{288.15}}$$

gdzie:

$\bar{n}_{zr}$  [%] - zredukowana względna prędkość obrotowa sprężarki;  
 $\bar{n}$  [%] - rzeczywista względna prędkość obrotowa sprężarki;

Jeżeli wezmę wzory

$$n_{red} = \sqrt{\frac{288.15}{T_{a2}}}$$

$$\varphi_{red} = \frac{\dot{m}_{a2}}{730.4} \frac{0.101325}{p_{a2}} \sqrt{\frac{T_{a2}}{288.15}}$$

I wstawię do równania (5.44)



$$\pi_{red} = k_0 n_{red} \varphi_{red} + k_1 \left( \frac{0.101325}{p_{a2}} \right) \quad (5.44)$$

to

$$n_{red} \varphi_{red} = \sqrt{\frac{288.15}{T_{a2}} \frac{\dot{m}_{a2}}{730.4} \frac{0.101325}{p_{a2}}} \sqrt{\frac{T_{a2}}{288.15}} = \frac{\dot{m}_{a2}}{730.4} \frac{0.101325}{p_{a2}}$$

I dalej :

$$\begin{aligned} \pi_{red} &= k_0 n_{red} \varphi_{red} + k_1 \left( \frac{0.101325}{p_{a2}} \right) = \\ &= \frac{\dot{m}_{a2}}{730.4} \frac{0.101325}{p_{a2}} + k_1 \left( \frac{0.101325}{p_{a2}} \right) = \left( \frac{0.101325}{p_{a2}} \right) \left( \frac{\dot{m}_{a2}}{730.4} + k_1 \right) = k_2 \frac{\dot{m}_{a2}}{p_{a2}} + k_3 \end{aligned}$$

$k_2, k_3$ - współczynniki.

Tj.

- 1) nie ma wpływu  $T_{a2}$  na spręż zredukowany  $\pi_{red}$ .
- 2) stosunek ciśnień zależy liniowo od parametru  $\frac{\dot{m}_{a2}}{p_{a2}}$

Tymczasem rys. 5.11 pokazuje zależność od temperatury powietrza zewnętrznego  $t_{zew}$ , o ile  $\varphi_{red} = const$ .

Dlaczego  $\varphi_{red} = const$ , a  $T_{a2}$  zmienia się we wzorze na  $n_{red}$  zgodnie z formułą:  $(y=ax+b)$

$$\pi_{red} = 1.065 n_{red} \varphi_{red} - 0.065 \left( \frac{0.101325}{p_{a2}} \right) ?$$

Według wyprowadzenia nie ma zależności od temperatury  $T_{a2}$ . Strumień  $\dot{m}_{a2}$  rośnie wraz ze spadającą temperaturą powietrza zewnętrznego, bo prędkość obrotowa turbiny jest stała i rośnie gęstość powietrza tj. ilość kg powietrza w tym samym  $m^3$ . Tj. przy tym samym ciśnieniu powietrza atmosferycznego  $p_{a2}$  są różne masy  $\dot{m}_{a2}$ . Gęstość zmienia się w przybliżeniu liniowo przy zmianie temperatury. Proszę o komentarz.

### 8.15. Pytanie 15

$$\dot{m}_{e0} = \dot{m}_{a17} + \dot{m}_{f9} \quad (5.60)$$

$$p_{e0} = (1 - \Delta p_{KS2})p_{a17} \quad (5.61)$$

$$h_{e0} = \frac{\eta_{KS}\dot{m}_{f9}LHV + \dot{m}_{a17}h_{a17}}{\dot{m}_{a17} + \dot{m}_{f9}} \quad (5.62)$$

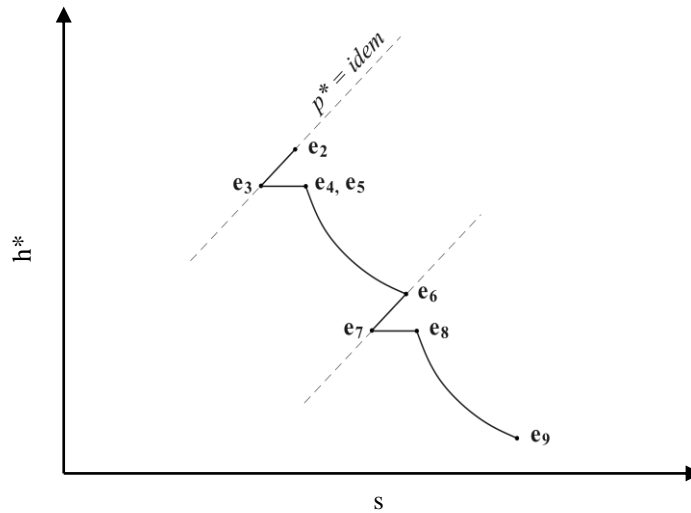
Do strefy wtórnej kierowana jest część powietrza uprzednio wykorzystana w celu chłodzenia elementów komory spalania narażonych na pracę w zakresie najwyższych temperatur. Rolą strefy wtórnej jest odpowiednie wprowadzenie dodatkowej ilości powietrza, pozwalającej na sfinalizowanie procesu spalania paliwa [94], [104], [139]. Strumień powietrza wtórnego wyznaczany jest tak, aby osiągnąć niewielki współczynnik nadmiaru powietrza założony na poziomie 1.2 (5.63) [104].

$$\dot{m}_{a18} = f(\dot{m}_{f9}, EAC = 1.2) \quad (5.63)$$

Czy to jest EAC obliczane względem strumienia paliwa, czy też 20% dodatkowego powietrza tj. sumarycznie  $EAC = 2.2$  ? Najpierw powietrze dostaje strumień stechiometryczny, a potem stechiometryczny + 20% ? Warto to doprecyzować tekście.

8.16. Pytanie 16

Jakie są wartości  $h$  i  $s$  (lub rząd wartości) na rysunku ?



8.17. Pytanie 17

Według tekstu

$e_5 - e_6$ – wieniec <b>wirujący</b> : strata temperatury,
$e_6 - e_7$ – <b>wieniec wirujący</b> : strata ciśnienia,
$e_7 - e_8$ – wieniec <b>wirujący</b> : drugi etap ekspansji (po uwzględnieniu strat mieszania).

dochodzi do zmiany ciśnienia. Tymczasem na rysunku 5.19 jest  $p = idem$ . Proszę o komentarz.

8.18. Pytanie 18

Na linii  $e_5 - e_6$  rozpatrywano pierwszy etap ekspansji gazów spalinowych w obrębie wienca wirującego. Parametry w punkcie  $e_6$  wyznaczano zgodnie z zestawem równań modelowych (5.74), (5.75).

$$p_{e6}^* = \frac{p_{e5}^* + p_{e10}^*}{2} \quad (5.74)$$

$$h_{e6}^* = h_{e5}^* - \frac{h_{e5}^* - h(p_{e6}^*, s_{e5}^*)}{\eta_{eksp}} \quad (5.75)$$

Dlaczego przyjęto  $p_{e10}$ , a nie  $p_{e9}$ ? Dlatego, że  $p_{e10}$  uwzględnia już stratę ciśnienia, a nie temperatury? A może i  $p_{e9}$ , bo to koniec przemiany w następnym stopniu? A może przyjąć  $(p_{e9} + p_{e10}) / 2$ ?

## 9. Oryginalność pracy i ogólna wiedza teoretyczna kandydata

### 9.1. Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

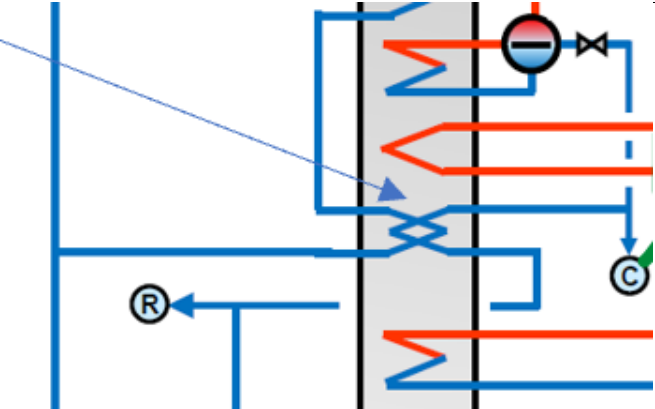

Autor rozprawy doktorskiej przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu modelowania bloku gazowo-parowego i udowodnił jego użyteczność jako modelu porównawczego mogącego służyć do weryfikacji stanów awaryjnych lub optymalizacji ekonomicznej pracy bloku gazowo - parowego. Recenzent dysponuje niezależnymi od autora pracy danymi z bloku gazowo - parowego na Żeraniu potwierdzającymi część osiągniętych wyników inną metodą.

### 9.2. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej

Autor rozprawy doktorskiej wykazał się umiejętnością samodzielnego znalezienia luki badawczej, zdefiniowania problemu naukowego oraz rozwiązania tego problemu. Kluczowe osiągnięcie pracy polega na skonstruowaniu i zaimplementowaniu sprawdzonego praktycznymi danymi modelu bloku typu CCGT. Autor rozprawy doktorskiej wykonał benedyktyńską pracę polegającą z jednej strony na zebraniu szczegółowych danych technicznych dotyczących turbiny oraz układu bloku, a z drugiej strony na ich opisanu od strony modelu matematycznego mającego kompletny zestaw równań od wlotu powietrza aż do wylotu ciepła i energii elektrycznej.

Praca jest napisana w sposób logicznie poukładany. Autor pokazuje najpierw schemat bloku gazowo-parowego, następnie schemat turbiny gazowej oraz omawia krok po kroku sposób działania bloku i turbiny podsumowując te rozważania modelem i obliczeniami. Autor rozprawy doktorskiej sformułował i rozwiązał postawione przez siebie zagadnienie.

## 10. Kryteria edytorskie

Str.	Jest	Powinno być/komentarz/pytanie
14	Umowa na realizację bloku gazowo-parowego w E 29 czerwca 2017 roku. Generalnym wykonawcą inwestycji jest Hitachi Power Systems i Polimeks-Mostostal SA.	Polimex
15		Połączone ? Czy lewa-prawa?
16	naprzeciw oczekiwaniom co do	,
	<p>Stworzony model obliczeniowy pozwolił</p> <p>Stworzenie wyczerpującego modelu</p> <p>Podstawowym zadaniem strefy pierwotnej jest stworzenie</p>	Utworzony
	<p>Uproszczony schemat przebiegu sygnałów regulacyjnych przedstawiono na Rys. 5.3.</p> 	<p>Brak opisu skrótów. Częściowo pojawiają się na następnej stronie</p> <p>FL -flow</p> <p>CSO – control system operation, control signal output</p> <p>GV – ? Governor frequency Value ?</p> <p>LD – load</p> <p>BP - blade protection z powodu sygnału T1TCSO</p> <p>EX – exhaust temperature</p> <p><a href="https://www.freepatentonline.com/y2020/0063662.html">https://www.freepatentonline.com/y2020/0063662.html</a></p>
	wartości sygnałów wypracowanych	Obliczonych
	<p>gazów rzeczywistych, są równania wywodzące się z teorii stanów odpowiednich. Równania te odwołują się do twierdzenia, że różne gazy rzeczywiste będąc pod działaniem tych samych</p>	Zasady, hipotezy

	<p>a) zasada zachowania <b>masy</b>,</p> $\dot{m}_m = \dot{m}_e + \dot{m}_a$	Strumienia masy								
	<p>z głównym strumieniem wlotowym podnosząc jego temperaturę. Różnica pomiędzy temperaturą powietrza atmosferycznego i wlotowego do sekcji sprężarkowej utrzymywana jest na stałym poziomie (5.1).</p> $T_{a1} = T_{a0} + \Delta T \quad (5.1)$ <p>Przyrost temperatury powietrza <math>\Delta T</math> wyznaczono rozwiązując zagadnienie zdefiniowane względem temperatury wlotowej jako (5.2). Podsumowanie osiągniętych wyników zestawiono w Tab. 5.2.</p> $\sum (T_{a2_{dane}} - T_{a2_{model}})^2 \rightarrow \min \quad (5.2)$ <p>Tabela 5.2: Podsumowanie wyników dla równania modelowego przyrostu temperatury powietrza wlotowego podczas pracy układu przeciwbiodzeniowego.</p> <table border="1" data-bbox="405 734 855 875"> <thead> <tr> <th>Równanie modelowe</th> <th><math>T_{a2} = T_{a1} + 4.01</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Współczynnik determinacji <math>R^2</math></td> <td>99.79%</td> </tr> <tr> <td>Średni błąd bezwzględny <math>MAE</math></td> <td>0.10 K</td> </tr> <tr> <td>Średni błąd względny <math>MRE</math></td> <td>0.03%</td> </tr> </tbody> </table>	Równanie modelowe	$T_{a2} = T_{a1} + 4.01$	Współczynnik determinacji $R^2$	99.79%	Średni błąd bezwzględny $MAE$	0.10 K	Średni błąd względny $MRE$	0.03%	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Brak opisu zmiennych <math>T_{a1}</math>, <math>T_{a0}</math></li> <li>2. Ze zdania wynika <math>T_{a1}</math> = atmosferyczne, <math>T_{a0}</math>=wlotowe do sprężarki</li> <li>3. Tymczasem poniżej użyto następujących indeksów 1,2 bez związku z indeksami 0,1 , ponadto <math>dT=+4</math> C tj. „Różnica pomiędzy temperaturą powietrza atmosferycznego i wlotowego do sekcji sprężarkowej” = 4 C czyli temperatura w sekcji wlotowej sprężarki jest niższa od temperatury zewnętrznej powietrza atmosferycznego, co jest nieprawdą.</li> </ol>
Równanie modelowe	$T_{a2} = T_{a1} + 4.01$									
Współczynnik determinacji $R^2$	99.79%									
Średni błąd bezwzględny $MAE$	0.10 K									
Średni błąd względny $MRE$	0.03%									
		Używanie [MW] zamiast „,MW” np. rys. 8.1								

## 11. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

Nieścisłości w tekście nie wpływają na ogólny obraz pracy i są łatwe do skorygowania bez sięgania do innych źródeł. Wymieniono je w części recenzji dotyczącej edycji tekstu oraz dyskusji i pytań do pracy.

## 12. Podsumowanie, wyróżnienie i wnioski

W pracy doktorskiej opracowano i zastosowano analityczno-aproksymacyjny model matematyczny jednostki gazowo-parowej zlokalizowanej w Żeraniu, mający na celu m.in. diagnostykę i bieżącą ocenę pracy tego bloku poprzez porównywanie danych pomiarowych i modelowych. Model przedstawia relacje w bloku gazowo-parowym, łącząc metody analityczne i aproksymacyjne w celu osiągnięcia kompleksowego zrozumienia jej zachowania. Badania dotyczyły różnych komponentów, w tym turbiny gazowej, kotła odzysknicowego, turbiny parowej oraz wyprowadzenia do sieci ciepłowniczej.

Opracowane podejście analityczno-aproksymacyjne zastosowane w modelu jest metodologią pozwalającą na zachowanie równowagi między dokładnością modelu a wydajnością obliczeniową napisanego oprogramowania w języku Python. Wykorzystując tę metodę, model ma na celu zapewnienie wszechstronnego narzędzia do diagnozowania problemów m.in. ocenę sprawności, zużycia paliwa i przewidywania zachowania się bloku CCGT w różnych warunkach pracy. Wszechstronność modelu rozciąga się na jego zastosowanie w różnych typach jednostek gazowo-parowych, co czyni go cennym zasobem dla inżynierów i badaczy pracujących w energetyce.

Wydawałoby się, że istniejące oprogramowanie (GateCycle, Epsilon itp.) daje możliwości modelowania obiektu, ale każdy obiekt wymaga indywidualnego podejścia ze względu na różnice w konstrukcjach bloków gazowo – parowych i brak danych pomiarowych. Nawet zdawałoby się te same jednostki potrafią się zachowywać inaczej.

Praca może być umieszczona pomiędzy książkami np. Tadeusza Chmielniaka (Obiegi termodynamiczne turbin ciepłych, Turbiny ciepłe - podstawy teoretyczne), Mahesha Rathore'a (Thermal Engineering), Janusza Kotowicza (Elektrownie gazowo-parowe) lub Krzysztofa Badydy i Andrzeja Millera (Energetyczne turbiny gazowe oraz układy z ich wykorzystaniem) stanowiąc ich uzupełnienie o zrealizowany praktyczny przykład teoretycznych rozważań.

Podsumowując, *"Analityczno-aproksymacyjny model matematyczny bloku gazowo-parowego do celów diagnostycznych i ewaluacyjnych"* znajduje się w czołówce innowacji technologicznych w energetyce. Jego znaczenie polega nie tylko na jego bezpośrednich zastosowaniach do precyzyjnej diagnostyki i oceny wydajności, ale także na jego potencjale do generowania postępu w szerszej dziedzinie modelowania i analizy bloków gazowo-parowych.



### 12.1. Wyróżnienie rozprawy

Proponuję wyróżnienie pracy ze względu na potencjał praktyczny związany z możliwościami modelu bloku gazowo – parowego.

## 12.2. Wniosek

Autor rozprawy – mgr inż. Paweł Trawiński – spełnia **art. 187** Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. Zm.).

<b>Art. 186. 1.</b> Stopień doktora nadaje się osobie, która:	
2023-10-19	
©Kancelaria Sejmu s. 109/262	
1)	posiada tytuł zawodowy magistra, magistra inżyniera albo równorzędny lub posiada dyplom, o którym mowa w art. 326 ust. 2 pkt 2 lub art. 327 ust. 2, dający prawo do ubiegania się o nadanie stopnia doktora w państwie, w którego systemie szkolnictwa wyższego działa uczelnia, która go wydała;
2)	uzyskała efekty uczenia się dla kwalifikacji na poziomie 8 PRK, przy czym efekty uczenia się w zakresie znajomości nowożytnego języka obcego są potwierdzone certyfikatem lub dyplomem ukończenia studiów, poświadczającymi znajomość tego języka na poziomie biegłości językowej co najmniej B2;
3)	posiada w dorobku co najmniej:
a)	1 artykuł naukowy opublikowany w czasopiśmie naukowym lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowej, które w roku opublikowania artykułu w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. b, lub
b)	1 monografię naukową wydaną przez wydawnictwo, które w roku opublikowania monografii w ostatecznej formie było ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. a, albo rozdział w takiej monografii, lub

©Kancelaria Sejmu s. 110/262	
<b>Art. 187. 1.</b> Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.	
2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.	
3. Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej.	
4. Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim. W przypadku gdy rozprawa doktorska nie jest pracą pisemną, dołącza się opis w językach polskim i angielskim.	

W szczególności :

- „*prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej*” ,
- przedstawił „*oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej*”
- rozprawa doktorska jest w formie pisemnej,
- w rozprawie znajduje się streszczenie w języku angielskim.

Dorobek własny autora obejmuje 4 pozycje traktowane jako publikacje

- [1] Trawiński P., *Development and implementation of mathematical models of working mediums for gas part of combined cycle gas turbine system in Python programming environment*, E3S Web of Conferences, Vol. 137, 2019
- [2] Trawiński P., *Development of flow and efficiency characteristics of an axial compressor with an analytical method including cooling air extraction and variable inlet guide vane angle*, Archives of Thermodynamics, Vol. 42 (4), pp. 17-46, 2021
- [3] Trawiński P., *Development of real gas model operating in gas turbine system in Python programming environment*, Archives of Thermodynamics, Vol. 41 (4), pp. 23-61, 2020
- [4] Trawiński P., *Turbine stage expansion model including internal air film cooling and novel method of calculating theoretical power of a cooled stage*, Archives of Thermodynamics, Vol. 43 (3), pp. 3-27, 2022

oraz wcześniejsze prace niepublikowane

- [5] Trawiński P., *Model matematyczny turbiny gazowej*, praca przejściowa inżynierska, Politechnika Warszawska 2012
- [6] Trawiński P., *Porównanie siłowni gazowo-parowej z siłownią z układem zgazowania węgla*, praca inżynierska, Politechnika Warszawska, 2013
- [7] Trawiński P., *Model matematyczny bloku gazowo-parowego*, praca przejściowa magisterska, Politechnika Warszawska, 2014
- [8] Trawiński P., *Analiza porównawcza modelu bloku gazowo-parowego w różnych aplikacjach*, praca magisterska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2014

Dorobek spełnia warunki podane w **art. 186** ustawy o stopniach naukowych.

**W związku z powyższym rozprawa spełnia warunki zapisane w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dział V Stopnie i tytuły w systemie szkolnictwa wyższego i nauki, rozdział 2. i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

dr hab. inż. Janusz Lichota, prof. PWR