

Prof.dr hab.inż. Janusz Kotowicz
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska
Ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice
e-mail: janusz.kotowicz@polsl.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Harutyunyana
pt. „ Analyses of thermodynamic parameters of gas turbines and combined
cycle power plants after repowering, working high above sea level”
(Analiza parametrów termodynamicznych turbin gazowych i układów gazowo-
parowych po repoweringu, pracujących wysoko nad poziomem morza)

A. Wprowadzenie

Turbiny gazowe oraz układy gazowo-parowe posiadają szereg powszechnie znanych zalet: wysoką sprawność konwersji energii chemicznej paliwa, bardzo niskie emisje substancji szkodliwych do środowiska – w tym również dwutlenku węgla (np. nowoczesne elektrownie gazowo-parowe nawet poniżej 330kg CO₂/MWh) i stosunkowo niskie nakłady inwestycyjne. Ważne są tutaj także w czasach dynamicznego zwiększania udziału odnawialnych źródeł energii w systemach energetycznych krótkie czasy rozruchu. Dość powszechnie uważa się, że w czasach transformacji energetyki do opartej na OZE, w tym wodorowej badane w pracy rozwiązania odegrają czołową rolę. Umiejętność wyznaczania charakterystyk termodynamicznych takich układów jest bardzo

ważna z punktu widzenia ich optymalizacji. Uwzględniając to, tematykę pracy mgr inż. Artura Harutyunyan należy uznać za ważną, zarówno z poznawczego jak i użytecznego charakteru prac naukowo-badawczych.

B. Zakres rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Artura Harutyunyan napisana jest w języku angielskim. Zawiera ona sumarycznie 236 stron, na które składa się łącznie 9 numerowanych rozdziałów oraz wnioski i literatura. Uzupełnieniem tego są trzy załączniki, streszczenie w języku polskim i angielskim, przedmowa oraz wykaz 4 publikacji związanych z realizacją pracy.

Rozdział 1-wszy zawiera główne cele oraz zakres pracy. Motywacją do badań jest duża liczba układów parowych, opalanych paliwami kopalnymi. Ich repowering poprzez konwersję do nowoczesnych układów gazowo-parowych spowoduje, że pojawiają się zalety w/w w punkcie A – charakterystyczne dla tych układów. Autor, co jest cechą charakterystyczną (zapewne ze względu na swoje pochodzenie) badać będzie układy położone na dużej wysokości n.p.m. (nawet 1742 m n.p.m.) i określa wpływ na ich charakterystyki termodynamiczne, temperatury powietrza, ciśnienia (lub wysokości) i wilgotności oraz różnych koncepcji repoweringu. Badania Autor przeprowadził przy użyciu różnych programów (GateCycle, EBSILON Professional, Aspen HYSYS, SIPEP) i porównał je częściowo z danymi pomiarowymi.

Rozdział drugi zawiera wprowadzenie teoretyczne do instalacji turbin gazowych i układów kombinowanych.

W rozdziale trzecim Autor przedstawia elektrownię gazowo-parową, zbudowaną na wysokości 1724 m n.p.m. w Armenii. Charakteryzuje jej główne elementy: turbinę gazową GT13E2 Alstom, kocioł parowy TGMP-344AS, turbinę parową kondensacyjną K-300-240 (LMZ).

Opis programów do symulacji pracy badanych obiektów, wykorzystywanych podczas obliczeń i analiz zawiera rozdział czwarty. Autor przedstawia tutaj programy: Gate-Cycle, EBSILON Professional, Aspen HYSYS, SIPEP.

W rozdziale piątym przedstawiono różne koncepcje repoweringu wraz z ich zaletami i wadami, w oparciu o dostępną literaturę przedmiotu.

W rozdziale szóstym zaprezentowano obliczenia i analizę repoweringu trzech różnych obiektów o mocy: 387, 300 i 200 MW. W pierwszym przypadku badano układ „hot wind box” dla istniejącej elektrowni. W drugim rozpatrywano 5 metod repoweringu istniejącej elektrowni parowej (300 MW). Badano wykorzystanie trzech różnych turbin gazowych: Siemens V84.2, ABB T11N2, Alstom GT13E2. Obliczenia prowadzono także dla częściowego obciążenia. W sumie pozwoliły one określić optymalne ze względu na sprawność i moc rozwiązania.

Oddziaływanie parametrów otoczenia na osiągi turbiny gazowej i układów gazowo-parowych Autor przedstawił w rozdziale siódmym na podstawie badań literaturowych i teoretycznych.

W kolejnym rozdziale (ósmym) przedstawiono obliczenia i analizę wpływu warunków środowiskowych - otoczenia (ciśnienia powietrza, temperatury, wilgotności względnej) na osiągi i parametry termodynamiczne turbin gazowych: GE GT13E2 i Siemens SGT-2000E2. Badania pierwszej z wymienionych przeprowadzono przy użyciu Gate-Cycle TM, HYSYS i Ebsilon, a drugiej wykorzystując SIPEP online. Obliczenia wykonano także przy częściowych obciążeniach. W przypadku turbiny GT13E2 przedstawiono wyniki pomiarów na rzeczywistym obiekcie (punkt 8.6), co umożliwia ich porównanie z obliczonymi.

W rozdziale dziewiątym obliczono i analizowano wpływ środowiska (parametrów otoczenia – ciśnienia, temperatury, wilgotności względnej) na charakterystyki układów gazowo-parowych, w których zainstalowano turbiny: GE GT13E2 i Siemens SGT-2000E2 (tj. te same, które badano w rozdziale

ósmym). Obliczenia układu z pierwszą turbiną wykonano, wykorzystując program GATE-CYCLE, analizowano 3 warianty repoweringu (opisane w rozdziale 3) przy mocy turbiny parowej 300 MW. Obliczenia dla układu parowo-gazowego z drugiej z wymienionych turbin gazowych (Siemens), wykonano przy użyciu symulatora SIPEP. Analizowano tutaj 3 przypadki: z zastosowaniem chłodzenia powietrznego (wymuszonego) w części parowej, z zastosowaniem chłodzenia mokrego w części parowej, z zastosowaniem w układzie dwóch turbin gazowych i dwóch kotłów odzysknicowych i chłodzenia mokrego w obiegu parowym.

Po rozdziale dziewiątym w pracy przedstawiono bardzo szczegółowe wnioski; zawarto je na 6 stronach (210-215). Odnoszą się one zarówno do wyboru technologii repoweringu jak i określenia wpływu warunków środowiskowych (parametrów otoczenia) na charakterystyki termodynamiczne (głównie sprawności i mocy) analizowanych turbin gazowych i zbudowanych przy ich wykorzystaniu układów gazowo-parowych.

Spis literatury do pracy jest obszerny i zawiera 103 pozycje. Na końcu pracy zamieszczono 3 załączniki: pierwszy z podstawowymi parametrami wybranych układów gazowo-parowych, drugi to lista układów zainstalowanych powyżej 800 m. n.p.m., trzeci to parametry gwarancyjne turbiny GT13E2.

C. Ocena rozprawy

1. Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest ważna i interesująca. Praca jest napisana w większości przejrzysto i podzielona na logiczne, wynikające z układu pracy rozdziały. Wymagała od Autora dobrego opanowania zagadnień teoretycznych, związanych z dyscypliną inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, przeprowadzenia skomplikowanych obliczeń numerycznych, opracowania i analizę wyników.

2. Autor w pracy przeprowadził analizę i obliczenia wpływu środowiska (parametrów otoczenia) na charakterystyki instalacji turbiny gazowej i układów gazowo-parowych. Obliczenia i dyskusja przeprowadzona w sposób systematyczny pozwala uporządkować wiedzę w tym zakresie. Natomiast wpływ wysokości (powyżej 800 m. n.p.m., a nawet 1724 m n.p.m.) jest ważnym uzupełnieniem wiedzy literaturowej o badanych układach.
3. Użycie do przeprowadzonych obliczeń i analiz wielu programów (także stosowanych komercyjnie), takich jak GATE CYCLE, EBSILON Professional, Aspen, HYSYS i SIPED umożliwiła Autorowi ich ocenę – także przez porównanie z danymi pomiarowymi.
4. Ocena termodynamiczna badanych w pracy układów została przeprowadzona nie tylko przy obciążeniach nominalnych ale także przy częściowych obciążeniach turbin gazowych i układów gazowo-parowych. W konsekwencji Autor zaproponował metody poprawy ich efektywności.
5. Autor w dysertacji przeprowadził szerokie badania wpływu różnych technologii repoweringu na charakterystyki termodynamiczne badanych układów. Pozwalają one określić optymalne ze względu na sprawność i moc rozwiązania.
6. Przeprowadzone badania w/w punktach 2,4 i 5 dotyczyły:
 - Różnych mocy obiektów poddawanych repoweringowi
 - Różnych stosowanych turbin gazowych
 - Różnych sposobów chłodzenia w obiegu parowym
 - Różnych konfiguracji układów

W ten sposób liczba obliczanych i analizowanych przypadków była wyjątkowo duża.

D. Uwagi krytyczne i dyskusyjne.

- *W rozdziale 7 podrozdziale 1 Autor w punkcie 1 opisuje wpływ TIT (Turbine Inlet Temperature) na sprawność turbiny gazowej. Punkt ten powinien dotyczyć temperatury COT (Combustor Outlet Temperature), którą to podają producenci w ramach klasyfikacji turbin gazowych. Temperatura TIT zgodnie z normą ISO-2314 jest temperaturą teoretyczną (nie da się jej zmierzyć w realnej turbinie z uwagi na fakt, iż norma traktuje, iż jest to temperatura spalin na wlocie do 1 stopnia ekspandera turbiny gazowej ale po zmieszaniu z całkowitym strumieniem powietrza chłodzącego ekspander).*
- *Na stronie 32 Autor napisał „Current barrier of net electric efficiency of the CCGT plant can be exceeded in the near future through the increase in the gas turbine efficiency, which can be realized in two ways: using gas turbines with standard pressure ratios (about 20), with a high turbine inlet temperature at the level of 1700 °C (J-class turbines) and using of modern gas turbine cooling concepts (**steam cooling**) and the reduction of NOx emission.”. Obecnie u praktycznie wszystkich producentów turbin gazowych nie ma w ofercie turbin gazowych z chłodzeniem parowym w klasie H. Producenci wprowadzili modernizacje tych klas i wrócili do chłodzenia powietrznego w zakresie układu przepływowego ekspandera turbiny gazowej (np. GE wprowadziło turbiny gazowe 9H.A – litera A oznacza właśnie, że ekspander chłodzony jest powietrzem). Czy autor domyśla się dlaczego producenci wrócili do chłodzenia powietrznego?*
- *Na stronie 33 Autor napisał „But many combined cycle developers focus on gas turbine only, and very few authors have investigation of steam cycle beginning with heat-recovery steam generator.”. Dlaczego rozwój układów gazowo – parowych skupia się głównie na rozwoju turbin gazowych? W*

elektrowniach węglowych w obiegu parowym stosuje się parametry nadkrytyczne pary, natomiast w elektrowniach gazowo – parowych praca obiegu parowego nadal jest w zakresie podkrytycznym. Dlaczego w układach gazowo – parowych nie stosuje się parametrów nadkrytycznych pary?

- *Autor w podsumowaniu napisał „The parallel hot wind-box repowering method was selected as the best method of repowering...”. Efekt termodynamiczny jest niezwykle istotny, jednakże w przypadku modernizacji, kluczową rolę odgrywa rentowność inwestycji – czyli efekt ekonomiczny. Czy zdaniem Autora efekt ekonomiczny również będzie najlepszy dla tej konkretnej modernizacji?*
- *Praca jest bardzo obszerna obejmująca wiele modernizacji, z czego każda z nich przedstawiona jest w funkcji kilku zmiennych, jednakże w odczuciu czytelnika istnieje brak przejrzystości założeń dla danego modelu/modernizacji, co w dużej mierze utrudnia weryfikacje uzyskanych wyników (ewentualnie przedstawienie parametrów termodynamicznych dla każdego punktu w modelu dla przykładowego punktu pracy i dołączenie danych w formie tabeli jako załącznik do pracy byłoby bardzo pomocne).*

E. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

- Strona 1; Strona tytułowa: *Błędne przetłumaczenie polskich tytułów i stopni naukowych:*
 - „prof. Krzysztof Badyda, D.Sc. Ph.D. Eng.” *powinno być* „Krzysztof Badyda, BEng, PhD, DSc, ProfTit”
 - „Ph.D Marcin Wołowicz, Ph.D” *powinno być* „Marcin Wołowicz, BEng, PhD”
- Strona 5: Abstract; *Liczne błędy językowe:*
 - „supplemenetary” *powinno być* „supplementary”

- „concretly” *powinno być* „concretely”
- „performnace” *powinno być* „performance”
- „studyed” *powinno być* „studied”
- „condensat” *powinno być* „condensate”
- „Profesional” *powinno być* „Professional”
- Strona 6: Streszczenie w języku polskim; *W pierwszym zdaniu streszczenia występuje czterokrotnie spójnik „i”.*
- Strona 22: *Błąd językowy:*
 - „unfavourable” *powinno być* „unfavorable”
- Strona 29: *Błąd interpunkcyjny:*
 - „It was built by General Electric and produced 3.5 MW of power. [9].” *powinno być* „It was built by General Electric and produced 3.5 MW of power [9].”
- Strona 32: *Błąd językowy:*
 - *Na Rysunku 2.6 nazwa osi to „N Gas-seam, [MW]” powinno być „N Gas-steam, [MW]”*
- Strona 41: *Błąd interpunkcyjny:*
 - „Transformer. (see Fig. 3.2).” *powinno być* „Transformer (see Fig. 3.2).”
- Strona 42: *Błąd językowy:*
 - „concentred” *powinno być* „concentrated”
- Strona 64: *Błąd interpunkcyjny:*
 - „...and give possibilities to use an existing site more effectively. [43].” *powinno być* „...and give possibilities to use an existing site more effectively [43].”
- Strona 136: *Błąd językowy:*
 - „the inti-icing system” *powinno być* „the anti-icing system”
- Strona 163: *Błąd językowy:*

- „CateCycleTM” powinno być „GateCycleTM”
- Strona 208: Tabela 9.9. Kilkukrotny błąd językowy:
 - „variantions” powinno być „variations”
- Strona 210: Błędy językowe:
 - „environmental” powinno być „environmental”
 - „empowering” powinno być „repowering”
 - „caclualted” powinno być “calculated”
- Cała praca: Jednostki temperatury „⁰C” zamiast „°C”
- Cała praca: Autor stosuje 2 sposoby przedstawienia zakresów:
 - 50 – 65 (np. strona 32)
 - 40 ... 50 (np. strona 32)

Pierwszy jest poprawny.

ROZDZIAŁY:

- Rozdziały posiadają prawidłową kolejność.
- Autor w rozdziale 7 w podrozdziale 1 i w 2 stosuje dodatkowe punkty. W podrozdziale 1 jedno z nich np. 3, 4, 5, 6, 8 są podkreślone a 1, 2 oraz 7 nie. Czy to oznacza, że są mniej ważne?

NOMENKLATURA:

- Nomenklatura prawidłowa.

NUMERACJA RYSUNKÓW:

- Rysunki 8.17 i 8.18 nie posiadają odniesienia w tekście.
- Rysunek 2.2 (strona 21) w legendzie posiada podział na a) i b), natomiast na rysunku nie ma takowych oznaczeń.
- Autor na stronie 117 odwołuje się do rysunku, który nie istnieje: „According to the curves in Figure 6.3.11 the variation of **CCPP power** was *from 397.8 MW to 306.6 MW...*”
- Autor stosuje 2 sposoby numeracji rysunków co wprowadza dezorientację dla czytelnika:

1. *Autor numeruje rysunki względem numeru rozdziału np.*

- *w rozdziale 2 podrozdziale 1 są dwa rysunki oznaczone jako 2.1. oraz 2.2.*
- *w rozdziale 2 podrozdziale 5 są rysunki oznaczone jako 2.4 – 2.9.*

2. *Autor numeruje rysunki względem numeru podrozdziału (sytuacja występuje tylko w 6 rozdziale) np.*

- *W rozdziale 6 podrozdziale 2 podpodrozdziale (punkcie) 1 są rysunki oznaczone jako 6.2.1 – 6.2.12.*
- *W rozdziale 6 podrozdziale 3 podpodrozdziale (punkcie) 1 są rysunki oznaczone jako 6.3.1 – 6.3.9.*
- *Strona 58; Jeżeli rysunki są numerowane względem numeru rozdziału to Rysunek 4 powinien mieć numer 4.1.*
- *Strona 65; Rysunek 5.5. (Rysunek o takim samym numerze występuje wcześniej na stronie 62). Tym samym Rysunki 5.5 (ze str. 65) - 5.8 powinny posiadać poprawioną numerację.*
- *Autor stosuje na wykresach separator w postaci przecinka, natomiast w języku angielskim separatorem jest kropka.*

NUMERACJA TABEL:

- *Wszystkie tabele posiadają swoje odniesienie w tekście.*

LITERATURA:

- *Każda literatura posiada swoje odniesienie w tekście.*
- *Błędna nazwa czasopisma w [16]: „J. Polish Acad. Sci” powinno być „Archives of Thermodynamics”*

F. WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Artura Harutyunyan pt. „Analyses of thermodynamic parameters of gas turbines and combined cycle power plants after repowering, working high above sea level”, zawiera sformułowanie ważnych w dyscyplinie: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka zadań badawczych, ich rozwiązanie i dyskusję wyników.

W opinii końcowej chcę także podkreślić złożoność badanych problemów i związaną z tym konieczność przeprowadzenia żmudnych oraz pracochłonnych modeli i obliczeń. Autor w ich przeprowadzeniu wykazał się bardzo dobrą wiedzą i szeroką skalą umiejętności posługiwania się złożonymi technikami modelowania i obliczeń, jak i umiejętnościami opracowania i interpretacji wyników oraz szerokiej ich dyskusji.

Poziom merytoryczny rozprawy tworzy logicznie przemyślaną i spójną całość potwierdzającą dojrzałość Doktoranta do prowadzenia badań naukowych, w tym także z zakresie samodzielności i pracowitości.

Uważam, że opiniowana praca mgr inż. Artura Harutyunyan w pełni spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach i zasługuje na pozytywną opinię. Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Uwzględniając ponadto, że mgr inż. Artur Harutyunyan jest Autorem czterech publikacji związanych z pracą oraz, że praca zawiera interesujące i poszerzające wiedzę rozwiązania przedstawione szczególnie powyżej w ocenie rozprawy w punktach 2÷5, proszę o rozważenia wyróżnienia.

Gliwice, 30.08.2021r.

Janusz Kotowicz

