

Stanowisko do badania turbogeneratorów

Stand for exhaust-driven turbogenerators testing

WOJCIECH MIĄSKOWSKI
KRZYSZTOF NALEPA
PRZEMYSŁAW KOWALCZYK
KAMIL ADAMOWICZ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.92>

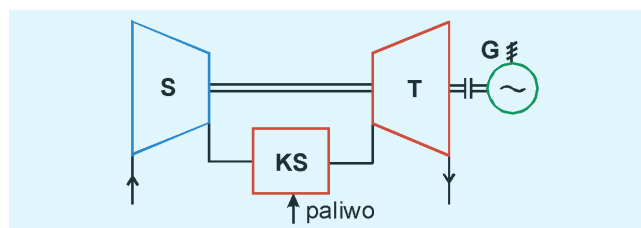
Przedstawiono tok postępowania podczas projektowania stanowiska badawczo-dydaktycznego do badania turbogeneratorów gazowych. W procesie projektowania zostało wykorzystane środowisko SolidWorks. Przeprowadzono niezbędne analizy inżynierskie, takie jak: rozważania koncepcyjne, obliczenia obiegu termodynamicznego turbogenerators, bilans energetyczny, obliczenia sprawności urządzenia i obliczenia wytrzymałościowe ramy konstrukcji. Obliczenia wytrzymałościowe wykonano w środowisku SolidWorks z dodatkiem Simulation. **SŁOWA KLUCZOWE:** turbogenerator, komora spalania, stanowisko badawcze

Presented is the designing procedure of the research and teaching stand for testing of exhaust-driven turbogenerators. The SolidWorks environment was used in the design process. The necessary engineering analyses were carried out, such as: conceptual consideration, calculations of the turbogenerator thermodynamic circuit, energy balance, device efficiency calculations, strength calculations of the structure frame, etc. The strength calculations were carried out using SolidWorks software with Simulation package.
KEYWORDS: turbogenerator, supply system, blast chamber, test stand

Siłownie energetyczne z turbinami gazowymi należą do grupy szybko rozwijających się instalacji energetycznych [2]. Turbogenerator, zwany również turbospółem, składa się z turbiny gazowej oraz generatora energii elektrycznej. Istotą działania turbogenerators jest zamiana energii chemicznej paliwa na entalpię, entalpii na energię mechaniczną, a następnie na energię elektryczną.

Turbina gazowa jest urządzeniem wirnikowym, a jej zasadniczym elementem jest wirnik z oprofilowanymi łopatkami nazywanymi wieńcem łopatkowym. Czynnikiem roboczym wywiera na łopatki wirnika nacisk przekształcany na moment obrotowy wirnika. Proces transferu energii maszyn wirnikowych wykorzystuje podstawowe prawa i zasady dynamiki płynów, a czynnik roboczy i jego energia kinetyczna mają tu istotne znaczenie [6].

Znaczna część konstruowanych obecnie turbin gazowych jest wykonywana w układzie prostym lub jego modyfikacji (rys. 1). W układzie prostym powietrze pobierane z otoczenia przez sprężarkę pompowane jest do komory spalania, gdzie następuje wymieszanie sprężonego powietrza z paliwem, a następnie jego spalanie. Tak powstały czynnik roboczy przedostaje się do turbiny, gdzie entalpia spalin jest zamieniana na ruch obrotowy wału turbospółarki, jednocześnie napędzając sprężarkę.



Rys. 1. Schemat turbospółki gazowej w układzie prostym: S – sprężarka, KS – komora spalania, T – turbina, G – generator elektryczny

Moc generowana na wale turbospółarki przekazywana jest na wał generatora, zamieniając energię mechaniczną na elektryczną. Wadą takiego rozwiązania jest to, że energia spalin wydostających się z turbiny pozostaje niewykorzystana. Drugą wadą jest trudność połączenia wału turbospółarki z generatorem ze względu na bardzo wysoką prędkość obrotową wału, sięgającą 150 000 obr/min [8]. Dlatego jest to raczej schemat działania turbogeneratorsa aniżeli model stosowany w praktyce.

Przykładową modyfikacją układu prostego (opisywaną np. w [1, 2, 4, 5]) jest zastosowanie dodatkowego elementu w postaci kolejnej turbiny niskoprężnej, która wykorzystuje rozprężone spaliny wylatujące z pierwszej – wysokoprężnej – turbiny. W tym rozwiązaniu generator jest połączony z turbiną niskoprężną, co dodatkowo ułatwia sprzężenie tych dwóch elementów, ponieważ prędkość obrotowa drugiej turbiny jest znacznie mniejsza (ok. 20 000 obr/min).

Cel i zakres prac

Celem prac jest zaprojektowanie, a następnie zbudowanie stanowiska badawczo-dydaktycznego do badania turbospółek gazowych. Będzie ono wyposażone w zespół turbinowy, układ zasilania, układy smarowania i chłodzenia, modułową ramę wsporczą, aparaturę kontrolno-sterującą itd. Całość konstrukcji ma spełnić warunki potrzebne do przetworzenia energii chemicznej paliwa (spalin) w energię elektryczną z jednoczesnym zapewnieniem uniwersalności stanowiska.

Najważniejsze założenia projektowe:

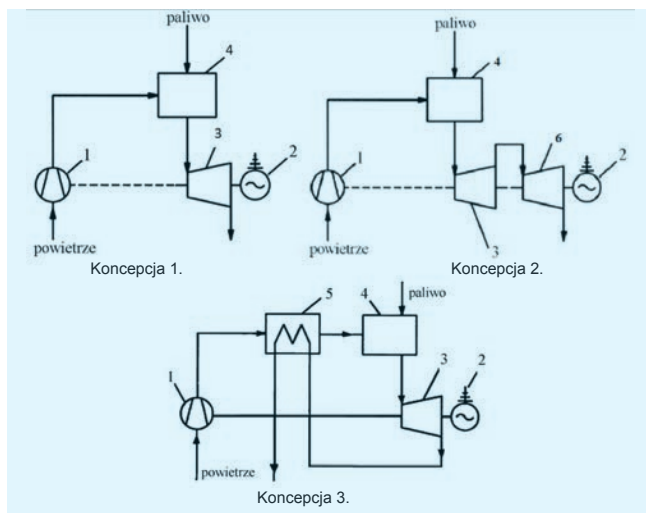
- osiągnięta moc wyjściowa ~1 kW,
- zastosowanie gazu propan-butan jako paliwa,
- uzyskiwanie na wale turbiny wysokociśnieniowej do 140 000 obr/min,
- temperatura gazów na wylocie z komory nie większa niż 900°C,
- średnia prędkość przepływu strumienia w komorze nie większa niż 20 m/s,
- zamontowanie komory tak, aby nie uległa odkształceniom plastycznym (nie obciążać statycznie), oraz żeby miała możliwość wykonywania termicznych odkształceń sprężystych,

* Dr inż. Wojciech Miąskowski (wojciech.miaskowski@uwm.edu.pl), dr inż. Krzysztof Nalepa (krzysztof.nalepa@uwm.edu.pl), inż. Przemysław Kowalczyk (przemo197@wp.pl), inż. Kamil Adamowicz (k.adamov@o2.pl) – Wydział Nauk Technicznych, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski

- modułowa budowa stanowiska pozwalająca na badanie różnych obiektów.

Analiza koncepcyjna

Analizę koncepcyjną prowadzono dla poszczególnych węzłów konstrukcyjnych projektowanego stanowiska. W niniejszym artykule przedstawiono rozważania dotyczące dwóch najistotniejszych elementów warunkujących poprawność pracy całego układu turbogeneratora. W pierwszej kolejności skupiono się na układzie pracy turbogeneratora, a następnie – układzie zasilania turbiny gazami powstałymi w wyniku spalania paliwa.



Rys. 2. Schematy koncepcji układów pracy turbospełów gazowych: 1 – sprężarka, 2 – generator, 3 – turbina, 4 – komora spalania, 5 – wymiennik ciepła, 6 – turbina wolnoobrotowa

Przyjęto trzy propozycje układu pracy turbogeneratora, przedstawione na rys 2. Koncepcja 1. jest oparta na rozwiązaniu, w którym turbospeł pracuje w układzie prostym. Koncepcje 2. i 3. to tzw. układy złożone, przy czym druga propozycja charakteryzuje się wykorzystaniem dwóch turbin, a trzecia wykorzystuje ciepło spalin do zwiększenia temperatury powietrza tłoczonego przez sprężarkę do komory spalania.

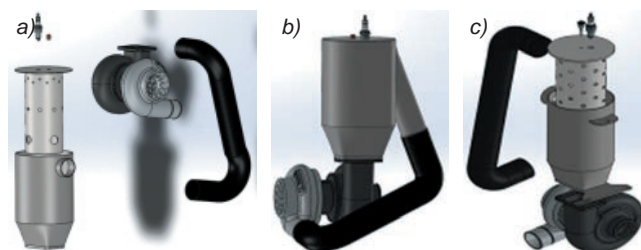
Po przeprowadzeniu analizy koncepcyjnej w oparciu o przyjęte kryteria – takie jak: sprawność układu, stopień skomplikowania, wymiary gabarytowe i koszt budowy – postanowiono zrealizować projekt w oparciu o koncepcję 2. Do realizacji projektu wybrano turbosprężarkę K03-2072 (BorgWarner). Z charakterystyki pracy sprężarki pozyskano informacje (prędkość obrotową, sprawność, masowe natężenie przepływu oraz spręż) niezbędne do prowadzenia dalszych prac koncepcyjnych i projektowych nad pozostałymi elementami turbospełu i całego stanowiska.

Głównym elementem układu zasilania turbogeneratora jest komora spalania [3]. Kluczowe jest jej odpowiednie zaprojektowanie, ponieważ energia spalin wytworzonych w komorze spalania będzie bezpośrednio wykorzystana do napędzania turbogeneratora [7], a w konsekwencji – do produkcji energii elektrycznej.

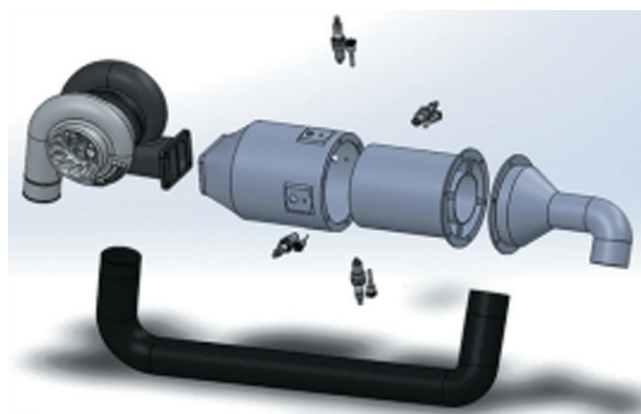
Koncepcje układu turbosprężarka–komora spalania:

- koncepcja A (rys. 3a) – rurowa komora spalania z przepływem prostym i z dyszą paliwową zamocowaną na turbosprężarce,
- koncepcja B (rys. 3b) – rurowa komora spalania z przepływem zwrotnym i z dyszą paliwową zamocowaną na turbosprężarce,

- koncepcja C (rys. 3c) – komora spalania z przepływem prostym i wtryskiwaczem paliwa, zamocowana do ramy konstrukcji i połączona z turbosprężarką,
- koncepcja D (rys. 4) – pierścieniowa komora spalania z przepływem prostym i wtryskiwaczami paliwa, osadzona na turbinie.



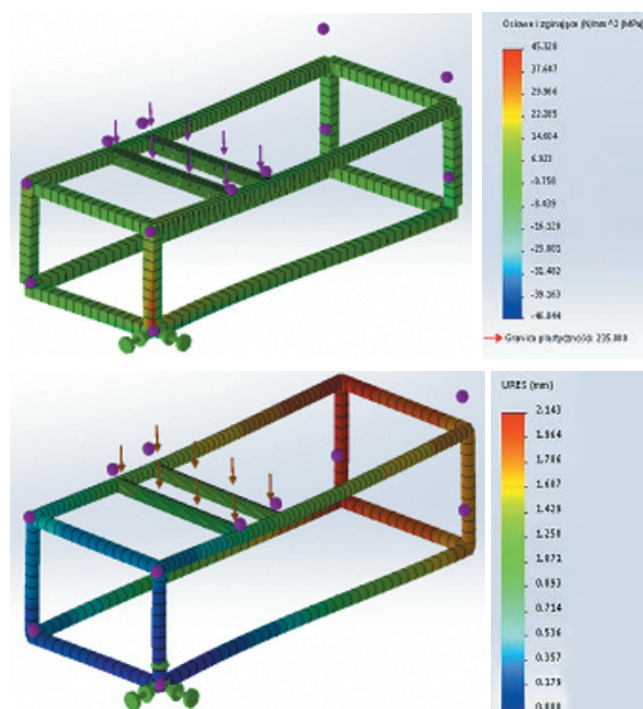
Rys. 3. Koncepcje A, B i C głównego elementu układu zasilania



Rys. 4. Koncepcja głównego elementu układu zasilania: D

Na podstawie analizy koncepcyjnej do dalszych prac wybrano wariant A.

Po wyborze koncepcji przeprowadzono obliczenia niezbędne do zaprojektowania układu zasilania, a zwłaszcza komory spalania.



Rys. 5. Wykres naprężeń i przemieszczeń ramy górnej z uwidocznionymi warunkami brzegowymi

Analiza symulacyjna wybranych elementów stanowiska

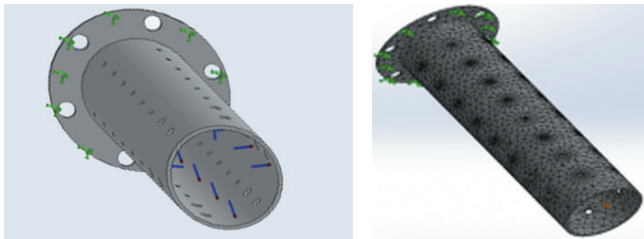
Metoda elementów skończonych posłużyła do sprawdzenia zachowania się elementów w warunkach zbliżonych do normalnych warunków pracy.

Analizy statyczne zostały przeprowadzone w środowisku SolidWorks 2016 z dodatkiem Simulation dla elementów komory spalania pracujących pod wpływem działania wysokiej temperatury oraz dla górnej ramy, do której będzie przytwierdzony turbosespół.

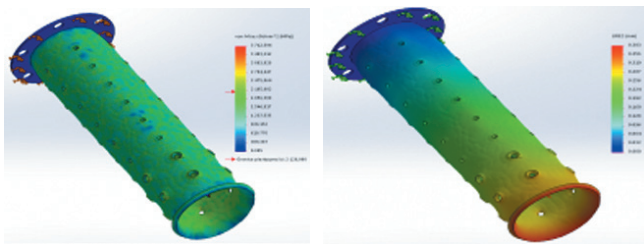
Model ramy został obciążony statycznie (rys. 5) siłami pochodzącymi od masy poszczególnych elementów projektowanego turbosespołu. Następnie dodano umocowania w węzłach oraz nałożono siatkę.

Do analizy statycznej ramy użyto siatki belkowej. Siatka była zagęszczona w niewrażliwych miejscach ramy. Siła pochodząca od ciężaru turbosespołu wynosiła 250 N. Maksymalna wartość naprężeń w analizowanej ramie nie przekroczyła 50 MPa (45,328 MPa) (rys. 5).

Rura płomieniowa została poddana analizie statycznej z udziałem temperatury. Komora spalania jest tak zamocowana do ramy, że nie działają na nią żadne siły zewnętrzne, a jedynym czynnikiem obciążającym jest temperatura sięgająca 1000°C. Na rurę płomieniową została nałożona siatka bryłowa (rys. 6).



Rys. 6. Rura płomieniowa z zadanyymi warunkami brzegowymi (w tym obciążeniem termicznym) oraz siatką bryłową

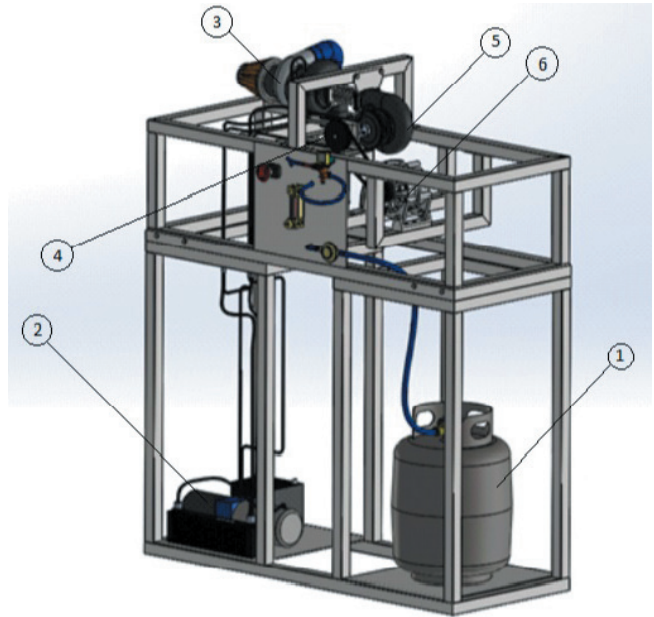


Rys. 7. Wykresy naprężeń i przemieszczeń rury płomieniowej

Z analizy wynika, że maksymalne przemieszczenia rury płomieniowej pod wpływem wysokiej temperatury nie przekroczyły 0,4 mm (rys. 7).

Budowa stanowiska

Na rys. 8 przedstawiono model 3D stanowiska wykonany w programie SolidWorks. Rama z profili stalowych 40×40×3 mm ma budowę modułową, która stanowi fundament całej konstrukcji. Na dolnej ramie przewidziano miejsce na butlę gazu (1) i układ smarowania olejowego (2). Do górnej ramy są przymocowane dodatkowe uchwyty i wsporniki, na których zamocowana jest turbosprężarka wysokociśnieniowa (3) połączona z komorą spalania (4) oraz – bezpośrednio za turbosprężarką – turbina napędowa (5) połączona za pomocą przekładni pasowej z generatorem energii elektrycznej (6).



Rys. 8. Model 3D stanowiska

Podsumowanie

Dzięki ciągłemu udoskonalaniu konstrukcji poprzez dodawanie kolejnych elementów, urządzeń oraz rozbudowywanie systemów sterowania turbiny gazowej osiągają coraz większą sprawność i stają się istotną alternatywą dla turbosespołów parowych mniejszej mocy.

Koncepcją najbardziej odpowiadającą założonym kryteriom jest model turbogeneratora gazowego pracującego w układzie złożonym, z dwoma turbinami. Takie rozwiązanie ułatwia sprzężenie wałów turbiny oraz generatora energii elektrycznej. Pierwsza turbina jest połączona ze sprężarką, a druga stanowi samodzielną turbinę napędową. Konstrukcje komory spalania oraz dobór sprężarek poparto obliczeniami oraz badaniami symulacyjnymi. W rzeczywistym modelu turbogeneratora należy zamontować aparaturę pomiarową do mierzenia: temperatury, ciśnienia, masowego natężenia przepływu, momentu obrotowego itd.

Na przedstawionym etapie prac wykonano dokumentację techniczną turbosespołu wraz z układami zasilania, smarowania oraz chłodzenia.

LITERATURA

1. Al-attab K.A., Zainal Z.A. "Design and performance of a pressurized cyclone combustor (PCC) for high and low heating value gas combustion". *Applied Energy*. 88, 4 (2011): s. 1084–1095.
2. Badyda K. „Charakterystyki złożonych układów z turbinami gazowymi”. *Rynek Energii*. 6 (2010): s. 80–86.
3. Diango A., Perilhon C., Descombes G., Danho E. "Application of exergy balances for the optimization of non-adiabatic small turbomachines operation". *Energy*. 36, 5 (2011): s. 2924–2936.
4. Dzierżanowski P. i in. „Turbinowe silniki odrzutowe”, Warszawa, 1983.
5. Korobitsyn M.A. "New and advanced energy conversion technologies. Analysis of cogeneration combined and integrated cycles". PhD Thesis. University of Twente, 1998.
6. Miller A. „Teoria maszyn wirnikowych – zagadnienia wybrane”. Warszawa, 1982.
7. Verstraete D., Bowkett C. "Impact of heat transfer on the performance of micro gas turbines". *Applied Energy*. 138 (2015): s. 445–449.
8. Wang W., Cai R., Zhang N. "General characteristics of single shaft microturbine set at variable speed operation and its optimization". *Applied Thermal Engineering*. 24, 13 (2004): s. 1851–1863.