

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Odyjasa
pt. „Ocena wpływu wybranych parametrów geometrycznych wentylatora
promieniowego z nową metodą regulacji na jego charakterystykę”

Promotor: dr hab. inż. Przemysław Moczko, prof. uczelni

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie pisma W10/D/65/2023 zleconego przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Pana prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 21 lipca 2023 roku oraz wymogów wyszczególnionych umową o dzieło nr 25/07/PRR/2023 z dnia 21 lipca 2023r.

2. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska poświęcona jest bardzo ważnej i aktualnej problematyce związanej z optymalizacją procesów technologicznych obejmujących wykorzystanie wentylatorów w systemach transportu masy, pędu i energii. Zakres zrealizowanych prac umożliwił poszerzenie wiedzy z zakresu regulacji pracy wentylatorów promieniowych. Rozprawa dotyczy poszukiwania odpowiedzi na pytania związane z poprawą efektywności realizowanych procesów przepływowych w systemach wentylatorowych eksploatowanych w obszarach przemysłowym i komunalnym. Rozprawa obejmuje 299 strony, podzielona jest na dziewięć rozdziałów uzupełnionych literaturą oraz czterema załącznikami. Pracę rozpoczyna spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz wykaz ważniejszych symboli. W następnej kolejności, autor, prezentuje osiem rozdziałów tematycznych, poczynając od impulsu będącego przyczynkiem rozpoczęcia prac, poprzez analizę stanu wiedzy, opis realizowanych prac badawczych i kończy ją podsumowaniem obejmującym jego własne spostrzeżenia.

Rozprawę doktorską, w części merytorycznej, rozpoczyna opis czynników które skłoniły autora do podjęcia się badań w obszarze maszyn przepływowych. W kilku zdaniach scharakteryzował własny rozwój naukowy i zaprezentował osiągnięcia od momentu rozpoczęcia pracy naukowej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej w roku 2011. Autor wskazał na konieczność ciągłego udoskonalania istniejących już konstrukcji oraz na konieczność poszukiwania nowych. Wprowadzania modyfikacji, które mają na zasadzie opracowanie nowych, dostosowanych do aktualnych potrzeb maszyn. Doskonalenie istniejących i tworzenie nowych rozwiązań winno być celem działań badaczy wszystkich

dyscyplin, w tym zajmujących się tak jak autor dysertacji badaniem i eksploatacją maszyn przepływowych. W drugiej części swojego wprowadzenia, autor, w zwięzły sposób wskazuje na niezaprzeczalny fakt, że rok do roku kraje rozwinięte i rozwijające się notują ciągły wzrost zużycia energii niezbędnej do funkcjonowania maszyn, w tym wentylatorów promieniowych, co ma bezpośredni wpływ na otaczające nas środowisko naturalne.

W rozdziale trzecim autor przedstawił analizę literatury w odniesieniu do maszyn przepływowych sprężających charakteryzując ich najważniejsze cechy, parametry projektowe i regulacyjne oraz zasadę sterowania pracą tych maszyn. W szczególności omówił różnice pomiędzy punktem znamionowym (projektowym) maszyny a punktem pracy, czyli zasadę współpracy maszyn sprężających z instalacją. W rozdziale przedstawione zostały metody regulacji wentylatorów: poprzez dławienie czynnika roboczego, regulacji prędkości obrotowej silnika napędowego, regulację poprzez zmianę geometrii kanałów przepływowych wentylatora, jak również poprzez zmianę kierunku napływu i spływu czynnika roboczego na wirnik i z wirnika maszyny oraz poprzez zmianę geometrii wirnika jego szerokości czynnej, średnicy lub położenia łopatek. Opis uzupełnia krótka analiza przykładów zastosowania metod mieszanych wykorzystujących, co najmniej dwie z wzmiankowanych metod regulacji. Cały rozdział jest bardzo obszernie zilustrowany przy użyciu źródeł bibliograficznych, co świadczy o bardzo dużej jakości zaprezentowanego podziału i opisów. Szczególnie wyróżnić pragnę zestawienie z tabeli 2 strona 55, znakomicie podsumowujące wcześniejsze charakterystyki.

Przedstawiona analiza stosowalności wentylatorów promieniowych oraz ich sposobów regulacji pozwoliła autorowi na wskazanie luki w stanie wiedzy obejmującej metody regulacji oparte o zmianę średnicy wirnika. W efekcie, autor w rozdziale 4, zaproponował trzy główne cele pracy, których realizacja przebiegać ma w sześciu etapach obejmujących: opis nowej metody regulacji, opracowanie opisu matematycznego i jego wstępną weryfikację, wykonanie analiz numerycznych oraz badań eksperymentalnych wybranych wentylatorów i porównanie wyników. Pozwoli to odpowiedzieć na pytanie: czy możliwe jest stworzenie nowej metody regulacji wentylatorów promieniowych opartych o zmianę długości łopatek wirnika i dzielonych na część stacjonarną i ruchomą w wirniku.

Rozdział piąty, to zwięzły opis budowy wirnika z informacją o zastrzeżeniu patentowym, które pośrednio leży u podstaw podjętego tematu badawczego dotyczącego nowego sposobu regulacji pracy wentylatora promieniowego. Należy tu nadmienić, że praca naukowa oparta o zgłoszenie patentowe [27] i rozwinięte w dysertacji może podlegać w przyszłości komercjalizacji, co jest dodatkowym atutem wyboru tematyki badawczej.

Nowy sposób regulacji wentylatora oparty na założeniu, że długość łopatki wirnika będzie ulegała zmianie wymusił opracowanie nowego opisu matematycznego. Zastosowana konwencja oparta jest na stosowanej obecnie w projektowaniu maszyn sprężających promieniowych z modyfikacjami wymuszonymi przyjętymi założeniami wstępnymi. Proponowany opis matematyczny zamieszczono w rozdziale 6 i obejmuje on m.in.: wyznaczenie nowego kąta spływu z łopatki - wzór (23), obliczenie względnej zmiany strumienia objętości (31) i (33), spiętrzenia wentylatora (43) i (44). Autor poddał analizie zaproponowane modyfikacje w równaniach i ocenia ich wpływ na uzyskiwane wyniki. Z podsumowania wstępnych analiz wynika, że uzyskiwane wartości spiętrzenia nieznacznie odbiegają od wartości referencyjnych, co uzasadnia użycie proponowanych nowych formuł. Wartości

uzyskane z wzorów (31) i (43) są dokładniejsze niż literaturowe. Na podstawie przedstawionych wyników stwierdzam, że opis matematyczny zaproponowany przez autora jest jego nowym wkładem w dyscyplinę obejmującą projektowanie wentylatorów promieniowych.

Rozdział siódmy poświęcony jest analizie numerycznej i badaniom eksperymentalnym. W pierwszej jego części, nie ujętej podrozdziałem, zamieszczono informację z rysunkami modeli wentylatorów, których wirniki były przedmiotem analiz. Najważniejsze dane geometryczne wirników wytypowanych do badań zestawiono w tabeli 8. Rozdział ten podzielony jest na cztery części obejmujący badania numeryczne i eksperymentalne wentylatora TES14-200, badania eksperymentalne wentylatora z projektu Effian CORNET oraz analizę numeryczną dla wentylatora w wariacie z maksymalnie wysuniętą ruchomą końcówką łopatki. W podrozdziale 7.1 autor opisuje równania, którymi posługiwał się w analizie numerycznej i przytacza równania Naviera-Stokesa dla płynów nieściśliwych wraz z równaniem ciągłości przepływu. W kolejnym akapicie pojawia się informacja, że poszukiwanymi zmiennymi zależnymi będą m.in. ciśnienia, prędkości, gęstości, temperatury itd. Nie przedstawiono w pracy informacji w jaki sposób domknięte będą opisy transportu energii. Możliwe jest kilka rozwiązań w zależności od przyjęcia izotermiczności przepływu lub też uwzględniające konwersje energii. Analiza numeryczna wykonana została przy użyciu programu Ansys Fluent. Program posiada wbudowane równania w różnych wersjach oraz procedury dyskretyzacyjne, o których autor pisze w swojej pracy, jak wzmiankowana w podrozdziale 7.1.2 „funkcja ściany” stosowana w opisie prędkości. W podrozdziale 7.2.3 omówiono przyjęte algorytmy rozwiązań wraz z modelami domykającymi tzw. modelami turbulencji. Autor wykonał analizę wpływu siatki dyskretyzacyjnej oraz analizę zbieżności uzyskiwanych rozwiązań dla przyjętych równań i warunków. Podejście takie uważam za poprawne i wysoce zwiększające prawdopodobieństwo uzyskania bardziej rzeczywistych wyników numerycznych (rysunki od 66 do 73). Uzyskane dokładności dla weryfikowanych modeli i algorytmów pokazane na rysunku 74 oraz błąd kilku procent uzasadniają poprawność przyjętej metody analizy numerycznej. W kolejnym podrozdziale zaprezentowano wyniki wielowariantowych obliczeń numerycznych modeli wirników w zakresie charakterystyk: przyrostu ciśnienia, sprawności i zapotrzebowanej mocy w funkcji strumienia objętości (wydajności). W podrozdziale 7.2 przedstawiono opis stanowiska pomiarowego wentylatora TES14-200 z badanymi wirnikami. Autor omówił cel badań sposób regulacji oraz wielkości rejestrowane w trakcie badań. W osobnej tabeli 23 zestawiono przyrządy pomiarowe z ich podstawowymi parametrami niezbędnymi do oszacowania dokładności badań. Wyniki badań zebrano w tabelach i na rysunkach. W podobny sposób opisano wentylator prototypowy projektu EfiFan CORNET, jego cechy konstrukcyjne, budowę, zasadę regulacji, schemat pomiarowy, zastosowaną aparaturę oraz wyniki wielowariantowych pomiarów dla różnych położań łopat nastawialnych. Wyniki w postaci charakterystyk zestawiono na wykresach. Dodatkowa analiza numeryczna obejmowała przypadek z maksymalnie wysuniętą łopata nastawialną i powstającą szczeliną międzyłopatkową. Porównanie wyników uzyskanych dla przypadku ze szczeliną oraz bez niej zestawiono w tabeli 31.

W rozdziale ósmym autor dokonał porównania wyników badań numerycznych i eksperymentalnych z wszystkich etapów prowadzonych prac w ramach realizowanej dysertacji.

Zgromadzone wyniki są bardzo obszerne i wszystkie zgromadzone zostały w załącznikach. Załączniki w kolejności dołączonej na końcu rozprawy obejmują: analizę metody opisu matematycznego zaproponowanego w rozdziale 6 w postaci tabelarycznej i na wykresach, wyniki pomiarów i obliczeń wentylatora TES14-200 z rachunkiem błędów, wyniki pomiarów i obliczeń prototypowego wentylatora z projektu EfiFan CORNET z rachunkiem błędów oraz wyniki analizy porównawczej obu typów wentylatorów przy przeliczaniu spiętrzenia całkowitego oraz natężenia przepływu. W pracy dla ułatwienia analizy, autor, zebrał najistotniejsze informacje w osobnych akapitach na stronach od 167 do 178, co wybitnie ułatwia analizę danych i przejrzystość opisu. Zestawienia w zwięzły sposób podsumowują obserwacje wynikające z analizy danych zawartych w załącznikach dla obu wentylatorów oraz badanych wirników lub wirnika z różnymi położeniami elementów ruchomych i nieruchomych łopatek wirnika.

W rozdziale 9 autor przedstawił podsumowanie prac realizowanych w ramach pracy doktorskiej. W podsumowaniu swoim autor odniósł się do celów jakie stawiał sobie do realizacji w rozdziale 4. Cele te obejmowały w kolejności opracowanie nowego opisu matematycznego wentylatora promieniowego, weryfikację stosowalności tej metody opisu z uwzględnieniem uzyskiwanych dokładności. Na podstawie zrealizowanych analiz numerycznych oraz badań eksperymentalnych możliwa jest także ocena i określenie zakresu stosowalności nowej metodologii. Aby ocenić skuteczność nowej proponowanej metody, autor, zweryfikował zakres regulacji odniesiony do możliwych zmian strumienia objętości i przyrostu ciśnienia całkowitego. Wykazał, że zakres regulacyjności w tym ujęciu może być zmieniony o 10 do 20% w stosunku do średnicy, co daje zmianę ok. 37% dla strumienia objętości i ok. 60% dla przyrostu ciśnienia wentylatora TES14-200.

Rozprawę doktorską kończy bardzo obszerny, bo liczący 149 pozycji, wykaz bibliograficzny.

3. Komentarze oraz spostrzeżenia wymagające komentarza autora

Cała analizowana rozprawa doktorska przedłożona do oceny jest przygotowana w sposób bardzo dobry. Cechuje ją poprawny układ rozdziałów, z podziałem na treści, ułożone w sposób chronologiczny adekwatny do potrzeb analizy zagadnienia badawczego. Autor dysertacji nie ustrzegł się drobnych błędów redakcyjnych, które w mojej ocenie nie umniejszają wartości całej pracy.

Niewielką niespójność tworzą wprowadzone tematy podrozdziałów czwartego stopnia. O ile rozdział drugi dotyczy metod regulacji, więc konsekwencją jego podrozdziały omawiają rodzaje regulacji, co nie budzi moich zastrzeżeń. Na tym tle kolejny stopień odnoszący się do podrozdziału 3.2.3 chyba zbyt często wykorzystuje słowo „Regulacja ...”. Proszę pamiętać, że już tytuł podrozdziału 3.2 informuje nas, że analiza dotyczy regulacji.

Zestawienie najważniejszych oznaczeń zawiera, zgodnie z jego brzmieniem, te najważniejsze. Pełny wykaz, w mojej ocenie, poprawia odbiór pracy i jej analizę, ponieważ użycie po kilkunastu stronach ponowne nazwy wielkości fizycznej lub jej sym-

bolu wymaga od czytającego sprawdzenia w tekście jego znaczenia. Zebranie wszystkich oznaczeń, jakkolwiek pracochłonne jest jednak bardzo pomocne. W spisie powtórzył się symbol któremu przypisano dwa różne znaczenia (spiętrzenie całkowite i statyczne).

Jak często się zdarza, również i w przypadku tej rozprawy, pojawiają się różnice w nazewnictwie i stosowanej symbolice. Różnice te uwarunkowane są etapami edukacji a w szczególności nazewnictwem przekazywanym uczniom przez ich nauczycieli. Dlatego nie powinien dziwić nikogo fakt, że podczas oceny rozprawy zwróciłem uwagę na terminologię, która będąc poprawną, w moim opisie mogła by mieć inne brzemienie. Odnosi się to np. do sformułowania wydatek lub wydajność. W moich pracach używam innej reguły niż nazwy własne. Jako miary wielkości podstawowych uważamy: czas s , masę kg , długość m (objętość m^3) i inne. Powstałe jednostki podrzędne: kg/s , m^3/s nazywam strumieniami mając jednak w pamięci, że strumień elektronów w czasie to Amper, a więc nazwa własna. Użycie przez autora zwrotów np.: natężenie przepływu, wydajność, czy spiętrzenie całkowite *nie uważam za błędne* lecz w mojej ocenie niepotrzebnie wprowadzamy dodatkową terminologię.

W podrozdziale 3.1, autor użył niefortunnie zwrotu „...optymalnego doboru optymalnego wentylatora ...”. Optymalność to sformułowanie odnoszące się do opisu matematycznego pozostającego podstawą analizy zmierzającej do uzyskania oczekiwanego rozwiązania. Jeżeli zgodzimy się z tym sformułowaniem to albo optymalizujemy dobór, co jest łatwe bo można wskazać na wielkość fizyczną będącą funkcją celu, albo optymalizujemy wentylator. Tylko, co to znaczy optymalizować wentylator? Jaka wielkość fizyczną opisujemy równaniem matematycznym? Zdanie jest zrozumiałe, ale zestawienie tych wyrazów wprowadza drobną niekonsekwencję.

Na rysunku 2 zabrakło mi krzywej obrazującej sprawność wentylatora pokazującej gdzie zlokalizowany jest punkt znamionowy (największej sprawności) lub drugiej czarnej kropki odpowiadającą maksymalnej sprawności. Ułatwiło by to czytającemu zrozumienie powodów wprowadzania regulacji w wentylatorach i zasady właściwego doboru maszyn sprzężających do instalacji.

W rozdziale czwarty przedstawiono cele pracy, ale nie podano w formie związanej jaki jest powód wskazania tych celów, istotnych z punktu widzenia badawczego. Czy sam akt możliwości wydłużania łopatek w celu regulacji jest wystarczającym powodem podjęcia się zadań? Czy też można sformułować bardziej precyzyjne założenie odnośnie tezy badawczej?

Na końcu rozdziału 6.3, autor, przedstawia w trzech punktach konkluzje końcowe analizy dotyczące stosowalności proponowanych równań służących do przeliczeń podstawowych parametrów wentylatora. Wspomina o zbieżności wyników i różnicach pomiędzy wynikami. Proszę o krótkie wskazanie możliwych przyczyn tych zmian, np. co przyczyniło się w ocenie autora do lepszej zgodności wyników.

W odniesieniu do rozwiązywanych równań w programie Ansys proszę, o ile to możliwe, o podanie formuły opisującej bilans energii jeżeli nie jest rozwiązywane zagadnienie izotermiczne. Proszę przytoczyć uzasadnienie przyjęcia w analizie modeli turbulencji dwórównaniowych $k-\epsilon$ i $k-\omega$, w miejsce modeli niższych rzędów lub od-

wrotnie, bardziej złożonego opisu bezpośredniego naprężeń przy użyciu modeli transportu naprężeń Reynoldsa. Opis metody numerycznej, w całości, uważam za wystarczająco dokładny.

Bardzo proszę o komentarz, dotyczący możliwych powodów uzyskania nieznacznej nieciągłości w przebiegach: ciśnienia, sprawności i mocy na rysunku 112 przy strumieniach objętości pomiędzy 2,0 i 2,8 m³/s. Czy wprowadzenie wielomianu przechodzącego poprzez punkty mające pewne dokładności jest w tym przypadku uzasadnione? Czy też obserwujemy w tym przedziale dodatkowy efekt pojawiające się w wentylatorze?

Bardzo proszę autora o ustosunkowanie się do moich dziewięciu uwag zmieszczonych powyżej. Równocześnie pragnę oświadczyć, że dostrzeżone prze zemnie drobne błędy i nieścisłości nie rzutują negatywnie na mój pogląd o całej rozprawie. Praca jest napisana w sposób bardzo dobry. Jej chronologia jest odpowiednia, a przyjęte metody wnioskowania ze wszech miar poprawne. Uzyskane bardzo obszerne wyniki są zaprezentowane w sposób czytelny i nie pozostawiający wątpliwości, co to słuszności podsumowania, z którym się zgadzam. Pragnę pogratulować autorowi wykonania prac badawczych i opracowania dysertacji na bardzo wysokim poziomie.

4. Ocena wartości merytorycznej rozprawy

W mojej opinii, struktura pracy nie budzi zastrzeżeń. Rozprawę uznaję za spójną, jej objętość za adekwatną do zakresu tematycznego i mieszczącą się w ramach przyjętych dla prac doktorskich. Autor przedstawia i komentuje wyniki uzyskane podczas analiz numerycznych i eksperymentalnych odnoszących się do nowatorskiej konstrukcji wentylatora z łopatkami o regulowanej długości. Głównym osiągnięciem autora jest opracowanie nowego opisu matematycznego opartego o dwie formuły pozwalające na przeliczanie wartości strumienia objętości oraz przyrostu ciśnienia całkowitego dla zmodyfikowanej długości łopatki nastawialnej wirnika promieniowego wentylatora. Wnioski te potwierdzają wykonane wielowariantowe badania dla różnych wirników, przy różnych strumieniach objętości przetłaczanego czynnika roboczego. Osiągnięcie uważam za tym istotne, że autor przedstawił swoje formuły w postaci prostych formuł matematycznych, które nawet w warunkach warsztatowych mogą być użyte w celu określenia nowej długości łopatki dla założonych strumieni objętości. Ponadto należy podkreślić, że w przypadku eksploatacji maszyny wyposażonej w system regulacji długości łopatki, zmiany geometrii wirnika skutkować będą lepszym dopasowaniem wentylatora do współpracującej instalacji, a tym samym zwiększeniem sprawności wykorzystania energii napędowej. Na wyróżnienie zasługuje również obszerność wykonanych analiz numerycznych i eksperymentalnych dla obu wytypowanych do badań wentylatorów.

Podjęte przez autora zadanie jest oryginalne i istotne zarówno dla sektora przemysłowego jak i sektora komunalnego. Nowatorskie konstrukcje, w tym konstrukcja wentylatora z regulowaną długością łopatki stanowią ważny kierunek badań prowadzonych na Politechnice Wrocławskiej. Uogólnione wnioski, uzyskiwane w ciągu lat badań mogą prowadzić do opracowania procedur projektowych i eksploatacyjnych dla nowej konstrukcji wenty-

latorów promieniowych. Badania autora, zwiększają różnorodności konstrukcji dostępnych do wyboru na etapie projektowania. Do osiągnięć autora zaprezentowanych w dysertacji zaliczam: obszerny przegląd literatury w zakresie spójnym z przyjętą koncepcją maszyny sprężającej promieniowej w odniesieniu do sposobów regulacji jej pracy, opracowanie wzorów obliczeniowych pozwalających na szybką analizę, opracowanie algorytmu obliczeniowego w programie Ansys, budowę stanowiska badawczego i wykonanie wielowariantowych analiz numerycznych i eksperymentalnych.

Autor wykazała się w pracy umiejętnością: formułowania celów badawczych, wykazał się umiejętnościami tworzenia algorytmów obliczeniowych oraz budowy stanowiska badawczego w oparciu o stawiane zadania badawcze. Autor rozprawy udowodnił, że w sposób wyważony w oparciu o dane literaturowe, wyniki obliczeń numerycznych i eksperymentalnych oraz własne interpretacje danych potrafi uzasadnić słuszność swoich założeń i formułować wnioski o charakterze użytkowym.

Uważam, że powyższe argumenty uprawniają mnie do stwierdzenia, że autor osiągnął założone w rozprawie cele i wykazała się bardzo dobrym poziomem przygotowania merytorycznego, umiejętnością prowadzenia analiz oraz poprawnym wnioskowaniem w oparciu o ich wyniki.

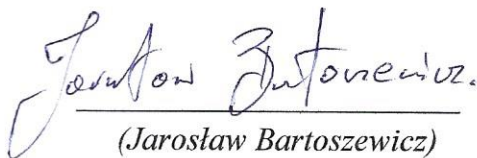
5. Podsumowanie

Moim zdaniem rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Odyjasa stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego i potwierdza wiedzę autora w obszarze technicznym obejmującym maszyny przepływowe w dyscyplinie **budowy i eksploatacji maszyn** (aktualnie: **inżynieria mechaniczna**).

Przedstawioną do oceny rozprawę doktorską oceniam pozytywnie pomimo drobnych błędów redakcyjnych, które nie umniejszają jej ogólnej wartości.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Ocena wpływu wybranych parametrów geometrycznych wentylatora promieniowego z nową metodą regulacji na jego charakterystykę” autorstwa Pana mgr inż. Piotra Odyjasa spełnia wymagania określone dla tego typu prac zgodnie z Ustawą z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r., nr 65, poz. 595, z późn. zm.) w zw. z art. 179 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2020.1086 z późn. zm.). Stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony, co może stanowić podstawę do nadania jej Autorowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie: **budowa i eksploatacja maszyn** (aktualnie: **inżynieria mechaniczna**), po spełnieniu pozostałych warunków określonych w przywoływanych Ustawach.

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.


(Jarosław Bartoszewicz)