

dr hab. inż. Szymon Grymek, prof. PG
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
sgrymek@pg.edu.pl

Gdańsk, 20.08.2023

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Tomasza Fąsa

NARZĘDZIA OCENY WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH TKANKI Z OBRZĘKIEM LIMFATYCZNYM

Zastosowanie metod: wgłębnikowej z modelem membranowym oraz pletyzmografii powietrznej

PROMOTOR: prof. dr hab. inż. Mariusz Kaczmarek

PODSTAWA PRAWNA: Pismo Przewodniczącego Rady Dziedziny Nauk Inżynieryjno-Technicznych UKW
dr. hab. inż. Mieczysława Cieszko, prof. UKW z dnia 05.07.2023.

TEMATYKA ROZPRAWY

O konieczności ciągłego rozwoju metod diagnostycznych stosowanych w medycynie nikogo nie trzeba przekonywać. Nawet te od lat z powodzeniem stosowane mogą zostać udoskonalone. Można zwiększyć ich dokładność, czułość, powtarzalność, uniezależnić wyniki od kompetencji personelu medycznego, poszerzyć grupę pacjentów, u których mogą być stosowane. Nie inaczej jest w przypadku schorzeń skutkujących pojawianiem się u pacjentów obrzęków, głównie kończyn. Skutkuje to licznymi pracami naukowymi i badawczo-rozwojowymi nad metodami i urządzeniami diagnostycznymi mającymi zastosowanie w przypadku występowania obrzęków.

W rozprawie Doktorant proponuje udoskonalenie dwóch metod diagnostyki dla chorób obrzękowych, szczególnie w przypadku obrzęku limfatycznego. Dla pierwszej z nich – testu wgłębnikowego – proponuje zmianę sposobu interpretacji wyników z wykorzystaniem teorii membran. W drugim przypadku proponuje urządzenie do pletyzmografii powietrznej o ponadstandardowym zakresie obsługiwanych ciśnień, co umożliwi realizację procedury diagnostycznej w trakcie trwania terapii kompresyjnej.

Uwzględniając powyższe uważam, że wybór tematu rozprawy doktorskiej jest trafny, aktualny naukowo i ważny z utylitarne punktu widzenia.

STRUKTURA I ZAKRES ROZPRAWY

Rozprawa doktorska mgr. inż. Tomasza Fąsa zatytułowana „NARZĘDZIA OCENY WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH TKANKI Z OBRZĘKIEM LIMFATYCZNYM. Zastosowanie metod: wgłębnikowej z modelem membranowym oraz pletyzmografii powietrznej” składa się z 10 rozdziałów, spisu literatury, 4 załączników, spisu treści, wykazu oznaczeń oraz streszczeń w języku polskim i angielskim. Całość została zaprezentowana na 155 stronach. Bibliografia obejmuje 256 pozycji, w tym 1 z udziałem Doktoranta.

W **rozdziale pierwszym** (4 strony) zawarto krótkie wprowadzenie w tematykę pracy, przedstawiono dwa założenia naukowe oraz cele użyteczne i zakres rozprawy.

W **rozdziale drugim** (7 stron) przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z anatomią i patologią układu limfatycznego, anatomie skóry i warstwy podskórnej oraz podstawowe metody terapii kompresyjnej.

W **rozdziale trzecim** (31 stron) omówiono stan wiedzy dotyczący metod diagnostycznych stosowanych w przypadku obrzęku limfatycznego. Poruszono problemy pomiaru: właściwości mechanicznych tkanek miękkich, objętości kończyn oraz nacisku wyrobów uciskowych na kończynę. Dokonano przeglądu metod i narzędzi znanych pod ogólną nazwą *pletymografia*.

W **rozdziale czwartym** (4 strony) przedstawiono koncepcję, realizowanych w ramach tej pracy, badań własnych dotyczących metody wgłębnikowej oraz pletymografii powietrznej.

W **rozdziale piątym** (7 stron) omówiono problematykę modeli fizycznych tkanek i układów tkanek, które to modele mogą być wykorzystane przy testowaniu metod i urządzeń pomiarowych.

W **rozdziale szóstym** (10 stron) opisano model matematyczny oraz wyniki obliczeń numerycznych dla obiektu w postaci membrany rozpiętej nad nieściśliwym płynem. Podstawowe równania modelu zostały sformułowane w punkcie 6.1. Punkt 6.2 opisuje przyjęte warunki brzegowe, zaś punkt 6.3 prezentuje uzyskane wyniki rozwiązania numerycznego.

W **rozdziale siódmym** (13 stron) omówiono dwa stanowiska badawcze oraz przeprowadzone, z ich wykorzystaniem, testy wgłębnikowe. Podjęto też próbę walidacji wyników i identyfikacji parametrów badanego materiału.

W **rozdziale ósmym** (15 stron) przedstawiono podstawowe założenia pletymografii powietrznej oraz podstawy teoretyczne modelowania jej przebiegu. Założono połączenie pletymografii z uciskiem pneumatycznym, co skutkowało koniecznością uwzględnienia w obliczeniach, ze względu na szybkie zmiany ciśnienia, zmian temperatury.

W **rozdziale dziewiątym** (34 strony) zaprezentowano autorski projekt pletymografu powietrznego i wyniki testów na nim przeprowadzonych.

Rozdział dziesiąty (4 strony) stanowi podsumowanie rozprawy. Zawiera wnioski płynące z wyników badań i odniesienie do postawionych hipotez.

OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Stan wiedzy i cele rozprawy

Swoją rozprawę Doktorant rozpoczął od określenia jej celów i zakresu. Następnie ogłosił dwie hipotezy, że *model membranowy może stanowić podstawę dla wyznaczania modułu Younga cienkiej powłoki rozpiętej nad ciałem nieściśliwym, którego moduł Younga jest znacznie niższy (stanowi to przybliżenie modelu skóry na tkance podskórnej wypełnionej płynem)* oraz że *możliwa jest konstrukcja urządzenia realizującego pletymograficzny pomiar zmian objętości przy ciśnieniach właściwych dla terapii uciskowej (do 120 mmHg)*.

W ramach przeglądu stanu wiedzy, na bazie bogatej bibliografii, Doktorant przedstawił zagadnienia dotyczące: obrzęku limfatycznego (mechanizmu jego powstawania i metod terapii), metod pomiaru właściwości tkanek miękkich, metod pomiaru objętości chwilowej, różnych wariantów pletymografii oraz metod pomiaru nacisku wyrobów uciskowych na kończynę. Przegląd ten w sposób właściwy wprowadza w tematykę pracy i w pełni uzasadnia postawienie wcześniej opisanych założeń naukowych.

Na zakończenie części wstępnej rozprawy Doktorant przedstawił koncepcję badań własnych, obejmujących prace nad: metodą wgłębnikowa z modelem membranowym oraz pletyzmografią powietrzną, które uzasadniają zakres rozprawy i wydają się wystarczające do weryfikacji postawionych hipotez.

Na stronie 9 po raz pierwszy pojawia się określenie „chwilowy pomiar objętości”. Istnieje pojęcie „pomiar chwilowy”, ale wykorzystywane jest jako przeciwieństwo pojęcia „pomiar ciągły”. Pojęcie użyte przez Doktoranta uważam za niefortunne. Podobnie niefortunny jest (strona 13) cytat z książki [6] – „ujemne ciśnienie”.

Na stronie 35 podano: „Aparatura wchodząca w skład urządzenia daje także możliwość pomiaru ciśnienia wydechane powietrza [150].” Pojęcie tego ciśnienia jest niedookreślone. Co więcej, chyba żadne klasyczne badania czynnościowe układu oddechowego nie przewidują pomiaru takiej wielkości.

Na stronie 46 podano bardzo ogólnie właściwości czujnika nacisku FlexiForce jako: „wysoka liniość”, „szeroki zakres mierzonych sił”. Korzystniej byłoby podać wartości liczbowe (katalogowe). Notabene, zakres pomiarowy pojedynczego czujnika wcale nie jest taki szeroki.

Modele fizyczne obiektów biologicznych

Pierwszy etap badań własnych Doktoranta stanowiło przygotowanie modeli fizycznych. W ramach prac zaprojektowano dwa modele. Pierwszy, w postaci elastomerowej membrany rozpiętej nad cieczą, do testów wgłębnikowych. Drugi, symulujący kończynę z obrzękiem, do badań pletyzmograficznych.

Obie konstrukcje należy uznać za udane i odpowiadające celom, dla których zostały zaprojektowane. Jednak należy stwierdzić, że rozprawa bardzo by zyskała, gdyby istotnie poszerzyć opis założeń projektowych.

Metoda wgłębnikowa

W pierwszym etapie prac nad metodą wgłębnikową Doktorant w prawidłowy sposób zdefiniował model matematyczny procesu nacisku wgłębnika na elastomerową membranę rozpiętą nad nieściślimym płynem. Model składał się z czterech równań różniczkowych uzupełnionych o cztery warunki brzegowe. Rozwiązano go wielokrotnie dla różnych parametrów układu i stwierdzono, że wstępne rozciągnięcie membrany ma istotny wpływ na jej kształt po odkształceniu. Następnie przeprowadzono walidację modelu numerycznego porównując wyniki symulacji z wynikami eksperymentalnymi. We wszystkich testach zmienną niezależną było przemieszczenie wgłębnika. Wykazały one istotną zgodność przewidywań teoretycznych z wynikami eksperymentalnymi.

Opis sposobu rozwiązania modelu jest skromny (str. 66) – „z wykorzystaniem algorytmu Rungego-Kutty”. A przecież to problem brzegowy i sam algorytm RK bez odpowiedniej „obudowy” nie wystarczy. Lepiej było opisać to jak w [230], do której i tak jest odwołanie w tym miejscu.

Na stronie 75 stwierdzono, że „wykorzystano metodę optymalizacji lokalnej (trust region method)”. To bardzo nieprecyzyjne stwierdzenie. Po pierwsze, prawie wszystkie metody optymalizacji to metody lokalne. Po drugie, istnieje kilka wariantów „trust region method”; prawie każdy wymaga podania gradientu funkcji celu.

We wzorach 7.1 (str. 75) i 7.4 (str. 81) wyrażenia w nawiasach kwadratowych chyba trzeba podnieść do kwadratu.

Pletyzmografia powietrzna

W ramach prac nad pletyzmografią powietrzną zaprojektowano i zrealizowano prototyp urządzenia wspomagającego diagnozę obrzęku przy ciśnieniu właściwym dla ucisku terapeutycznego. Urządzenie pozwala na pomiar zmian objętości obiektu w wyniku ucisku oraz oszacowanie średniej

sztynności uciskanego obiektu. Zrealizowano trzy warianty urządzenia: (1) z ręczną kalibracją, (2) z ręczną kalibracją i pomiarem temperatury oraz (3) z automatyczną kalibracją. Przeprowadzono serię testów mających na celu ocenę dokładności pomiarowej wykonanych prototypów. Wszystkie testy wykonano na modelu fizycznym kończyny. Wyniki porównano z wynikami bezpośredniego pomiaru zmian objętości pod mankietem uciskowym. Wykazano że: (1) w przypadku szybko zachodzących zmian objętości pod mankietem konieczne jest uwzględnienie zmian temperatury w modelu przemian gazowych, (2) pletyzmograf z kalibracją automatyczną może być wykorzystywany do wyznaczania modułu Younga materiału uciskanego obiektu i (3) pletyzmograficzny pomiar zmiany objętości nie różnił się od pomiaru bezpośredniego więcej niż o 0,8%.

Na rysunku 8.1.1b wkradł się chyba błąd pisarski, że podczas napełniania mankieta powietrzem ciśnienie w nim spada.

Na stronach 91 i 92 Doktorant dyskutuje model stanu gazu rzeczywistego w postaci równania van der Waalsa. Ostatecznie (i słusznie) stwierdza, że w warunkach w jakich prowadzone są eksperymenty model stanu gazu doskonałego jest dostatecznie dokładny. Nie zauważa jednak dwóch rzeczy. Po pierwsze, nie jest znany skład gazu (w szczególności wilgotność powietrza), co uniemożliwia precyzyjne wyliczenie stałych do równania van der Waalsa. Po drugie, z przedstawionej metodyki pomiarowej wynika, że stosuje model zbliżony do modelu gazu rzeczywistego. Z równania 8.7 wynika, że wartość C jest prawą stroną równania Clapeyrona $C = n \cdot R \cdot T$. Ponieważ C jest wyznaczane eksperymentalnie (proces kalibracji), to jego faktyczna wartość (dla określonych p i T) wynosi $C = Z \cdot n \cdot R \cdot T$, gdzie Z to współczynnik ściśliwości (kompresji) wynikający z wirialnego równania stanu gazu rzeczywistego. Dzięki takiemu podejściu można też wnioskować, że rodzaj zastosowanego gazu (lub skład mieszaniny gazów) nie ma istotnego wpływu na dokładność pomiarową analizowanego urządzenia.

W tabelach 9.2 (str. 110) i 9.3 (str. 116) pojawiają się elementy o nazwie (przepisanej z karty katalogowej) „rotacyjna sprężarka membranowa”. Wydaje mi się, że sprężarka może być albo rotacyjna, albo membranowa. Bardziej rzuca się w oczy bezkrytyczne podanie, za producentem, maksymalnego wydatku sprężarki w litrach na minutę [l/min]. Przecież to gaz i powinny być to normalne litry na minutę [Nl/min].

Podsumowanie rozprawy

W podsumowaniu rozprawy Doktorant przedstawił skrótoowo zakres wykonanych badań i główne wnioski z nich płynące. Na ich podstawie uzasadnił prawdziwość postawionych hipotez. Wskazał również kierunki dalszych badań i prac rozwojowych.

Całość podsumowania jest spójna, logiczna i zasługuje na akceptację, chociaż można by bardziej bezpośrednio odnieść się do stawianych hipotez.

ZAGADNIENIA DO DISKUSJI

Zagadnienie 1

Co, według Doktoranta, oznacza chwilowy pomiar objętości?

Zagadnienie 2

Cytat (akapit 1, strona 57): „Skóra przy wzroście prędkości twardnieje [226].” Prędkości czego? I czy faktycznie chodzi o wzrost twardości?

Zagadnienie 3

Przy analizie odkształceń membrany przyjęto model materiałowy *neo-Hookean* (strona 64). Czy rozważano przyjęcie bardziej złożonych modeli, np.: *Mooney-Rivlin*, *Ogden*, *Yeoh*?

Zagadnienie 4

Metody numeryczne do rozwiązywania zagadnień początkowych i zagadnień brzegowych – podobieństwa i różnice.

Zagadnienie 5

Jaki jest wpływ umieszczenia czujnika temperatury w zbiorniku dodatkowym, a nie w mankiecie kompresyjnym, na dokładność pomiarów? Czy możemy go oszacować?

OCENA EDYTORSKA I JĘZYKOWA ROZPRAWY

Jeżeli chodzi o nomenklaturę i język rozprawy, to są one na dobrym poziomie. Ważniejsze, zauważone usterki zebrałem w tabeli zamieszczonej poniżej. Warto zauważyć, że zdecydowana większość usterek (grubo ponad połowa) to problemy interpunkcyjne – brak lub nadmiar przecinków. Dodatkowo można mieć jeszcze trzy uwagi (brak ich w tabeli, gdyż nie są traktowane jako usterki):

1. stałą R lepiej określić jako „uniwersalna stała gazowa” niż samo „stała gazowa”,
2. nie negując istnienia pojęcia pomiar chwilowy określenie „chwilowy pomiar objętości” uważam za niezręczne; lepiej chyba „pomiar chwilowej objętości”,
3. z niektórych zdań rozprawy można odnieść wrażenie, że sztywność jest właściwością materiału, a nie materiału i geometrii.

Również pod względem edytorskim praca jest na dobrym poziomie. Zamieszczone w rozprawie rysunki i wykresy wykonane zostały starannie i dobrze opisane. Generalnie tekst jest dobrze sformatowany i łatwy w odbiorze. Wśród drobnych niedociągnięć można wymienić: 12 wdów (krótkie wyrazy w ostatniej linii akapitu) na stronach 17, 21, 22, 38, 39, 40, 54, 55, 66, 100, 112 i 124 oraz 6 sierot (pojedyncze litery na końcu linii) na stronach 27, 134 i 135. Dodatkowo w kilku miejscach podano wartości liczbowe wielkości fizycznych biorąc jednostki miary w nawiasy kwadratowe. W większości przypadków uznawane jest to za usterkę edytorską.

NR	STRONA	JEST	POWINNO BYĆ
1	6	czynnika temperaturowego	temperatury
2	8	opieki zdrowotnej	służby zdrowia
3	8	zastosowania elementów, możliwe	zastosowania, elementów możliwe
4	13	obszaru a nawet	obszaru, a nawet
5	14	20 %	20%
6	14	niejednoznaczne a metody	niejednoznaczne, a metody
7	16	Wyroby usiskowe	Wyroby uciskowe
8	16	dolnych części	dolnych części
9	19	obszarów, biorących	obszarów biorących
10	20	dwuosiosemu naprężeniu, którego siła	dwuosiosemu naprężeniu, którego wartość
11	20	skóry, uwzględniające	skóry uwzględniające
12	21	narzędziem, wymienianym	narzędziem wymienianym
13	22	głębokość a następnie	głębokość, a następnie
14	22	urządzenia, bazującą	urządzenia bazującą
15	30	bodowy modelu	budowy modelu
16	30	wady, utrudniające	wady utrudniające

17	34	spełniających definicję; znacząco	spełniających definicję i znacząco spełniających definicję, a znacząco
18	34	różniących się one między sobą	różniących się między sobą
19	34	ilustracjach, dołączonych	ilustracjach dołączonych
20	35	temperatury[149].	temperatury [149].
21	35	przyrządy, znane	przyrządy znane
22	35	ciała, jako	ciała jako
23	35	[158, 159] a nawet	[158, 159], a nawet
24	38	badania – a więc	badania, a więc
25	39	ciśnienie i temperatura się ustabilizuje	ciśnienie i temperatura się ustabilizują
26	39	patrzy rys. 3.3.8.	patrz rys. 3.3.8.
27	41	[199], lub	[199] lub
28	41	trudności, związane	trudności związane
29	42	metod, wykorzystujących	metod wykorzystujących
30	43	Rozkład naprężeń między	Rozkład naprężeń stykowych między Rozkład naprężeń kontaktowych między
31	48	brzegowe a w rezultacie	brzegowe, a w rezultacie
32	49	tym zakresie, muszą	tym zakresie muszą
33	49	opierać się na kompromisach	opierać się na kompromisie
34	51	opierające się o koncepcję	opierające się na koncepcji
35	52	powietrzem, mamy	powietrzem mamy
36	53	mięśniową reaguje	mięśniową, reaguje
37	53	rozłożonymi w czasie odkształceniami	zmieniającymi się w czasie odkształceniami
38	5	w kierunku promieniowy	w kierunku promieniowym
39	54	tkanek lub organów	tkanek i organów
40	54	czynników, nie zawsze	czynników nie zawsze
41	54	Duży postęp ... dostarczyła technologia druku	Duży postęp ... dała technologia druku Duży postęp ... umożliwiła technologia druku
42	55	weryfikacji symulacji numerycznej	weryfikacji modeli do symulacji numerycznej
43	56	testów, zaprezentowano	testów zaprezentowano
44	57	ilości testów	liczby testów
45	57	pacjentów a tym samym	pacjentów, a tym samym
46	58	zbiornika (g), połączonego	zbiornika (g) połączonego
47	58	ciśnienia a drugi	ciśnienia, a drugi
48	58	zaworem, umożliwiającym	zaworem umożliwiającym
49	58	wypływającą wodę, wyposażonym	wypływającą wodę wyposażonym
50	59	stabilne zamocowanie zbiornika	zamocowanie zbiornika pewne zamocowanie zbiornika właściwe zamocowanie zbiornika
51	60	zbiornik (a) jest połączony z zaworem (f) za pośrednictwem zakrętki (d), wyposażonej w przewód wylotowy (h) i mocowanie tego przewodu (b, c, e).	zbiornik (a) jest połączony z zaworem (f) za pośrednictwem układu króćca (b, c, e), trzymanego przez zakrętkę (d), oraz przewodu wylotowego (h).

52	63	membrany, problem	membrany problem
53	64	napięcia membrany, rozciągnięcia	napięcia membrany rozciągnięcia
54	64	energia odkształcenia W	funkcja gęstości energii odkształcenia W
55	68	odkształcenia a powiązane	odkształcenia, a powiązane
56	70	wgłębniakiem, staje	wgłębniakiem staje
57	72 rys. 7.1.3	120mm 100mm 130mm	Φ120 Φ100 Φ130
58	73	uniwersalnego mechanizmu śrubowego	samohamownego mechanizmu śrubowego
59	73	membranę a za pomocą	membranę, a za pomocą
60	74	wykonywane 2 lub 3 krotnie	wykonywane dwu lub trzykrotnie
61	74	zwiększając zagłębienie a następnie	zwiększając zagłębienie, a następnie
62	74	Taśmy lateksowe Thera-Band[231]	Taśmy lateksowe Thera-Band [231]
63	75	pod membrana	pod membraną
64	75	jest zeru a warunki	jest zeru, a warunki
65	76	0.285mm	0,285 mm
66	76	30N	30 N
67	76	0, 18 i 28N	0 N, 18 N i 28 N 0; 18 i 28 N
68	77, 79, 80	Tabeli 7.1	tabeli 7.1
69	77	napięciem a następnie	napięciem, a następnie
70	79	19N	19 N
71	81	0.1%	0,1%
72	81	Założono stałą niepewność standardowa	Założono stałą niepewność standardową
73	82	przyjętym założeniem jest stałą.	przyjętym założeniem ma stałą wartość.
74	85	określonego poziomu ciśnienia	określonego poziomu nadciśnienia
75	83 rys. 8.1.1b	ciśnienie (p) spada	ciśnienie (p) rośnie
76	86, 117, 123, 124	w momencie od momentu od momenty moment	w chwili od chwili od chwili chwila
77	86, 92, 116,117, 128	ilości moli ilość moli	liczby moli liczba moli
78	86	mankietem a także	mankietem, a także
79	88	powietrznej jest brak	powietrznej, jest brak
80	91	gazu, lub mieszaniny	gazu lub mieszaniny
81	94	powietrza a następnie	powietrza, a następnie
82	94	(rys. 8.4.1) a także	(rys. 8.4.1), a także
83	95	wolno) a jedynie	wolno), a jedynie
84	95	współczynnik C, wyznaczany	współczynnik C wyznaczany
85	97	w mankiecie a pierścień	w mankiecie, a pierścień
86	97	Z równania (8.21)	Z układu równań (8.21)

87	97	16 kPa ... 120mmHg	16 kPa ... 120 mmHg
88	98	przy czym, wraz ... układu, naprężenia ... rosną a naprężenia	przy czym wraz ... układu naprężenia ... rosną, a naprężenia
89	99	w powłoce, wykonanej	w powłoce wykonanej
90	100	pod nim, jest porównywalny z poziomem ciśnienia, mierzonym	pod nim jest porównywalny z ciśnieniem mierzonym
91	100	wyływu napięcia	wpływu napięcia
92	100	pomiarowy, złożony	pomiarowy złożony
93	100	napięcia a dane pomiarowe	napięcia, a dane pomiarowe
94	101	dętki, umieszczonej	dętki umieszczonej
95	101	nacisku a następnie	nacisku, a następnie
96	102	walca, jego	walca jego
97	104	kończynę, uznano	kończynę uznano
98	104	pneumatycznego, zachodzi	pneumatycznego, zachodzi
99	104	Uwzględnienie zmiennej cieplnej	Uwzględnienie rzeczywistego wpływu wymiany ciepła
100	104	wolniejszy, niż wzrost	wolniejszy niż wzrost
101	104	reakcji, wskazane	reakcji wskazane
102	104	wymogami, wystarczająco	wymogami wystarczająco
103	104	temperatury bezpośrednio	temperatury, bezpośrednio
104	106	o optymalnym zakresie	o odpowiednim zakresie pomiarowym
105	107	zmian ciśnienia	zmian ciśnienia
106	108	oraz stabilnych	oraz ustabilizowanych
107	111	pomiaru a po zakończonym	pomiaru, a po zakończonym
108	113	liczny moli	liczby moli
109	118	by czynnik temperaturowy mógł zostać	by wpływ zmian temperatury mógł zostać
110	119	5ml	5 ml
111	119	modelu, symulującego	modelu symulującego
112	121	objętości, zilustrowane	objętości zilustrowane
113	128	modelu, przeprowadzono	modelu przeprowadzono
114	128	zmieniano) a następnie	zmieniano), a następnie
115	128	posiło się przedstawioną już wcześniej geometrią	wykorzystano przedstawioną już wcześniej geometrię
116	131	materiału, o współczynniku	materiału o współczynniku
117	131	0.5	0,5
118	131	określić, jaka	określić jaka
119	131	moduł sprężystości skóry	wyznaczony moduł sprężystości skóry
120	132	dla określania	do określania
121	132	dla estymacji	do estymacji
122	133	opartą o kontrolowane zmiany objętości	opartą na kontrolowanych zmianach objętości
123	134	badań, wykazujących	badań wykazujących
124	134	wynikami, uzyskanymi	wynikami uzyskanymi

125	134	wytrzymałościowej, zgodnie	wytrzymałościowej zgodnie
126	135	oprzyrządowania, umożliwiającego	oprzyrządowania umożliwiającego
127	136	nacisku, jako	nacisku jako
128	136	parametrów a także	parametrów, a także
129	136	pomiaru pletyzmo graficznego i bezpośredniego	pomiaru pletyzmo graficznego i pomiaru bezpośredniego
130	136	bezpośredniego, zarejestrowanych	bezpośredniego zarejestrowanych
131	45	metod wytrzymałościowych	metod badań wytrzymałościowych

PODSUMOWANIE RECENZJI

Zaprezentowana do recenzji rozprawa doktorska ukazuje, że Doktorant analizując stan wiedzy w zakresie metod diagnostycznych chorób obrzękowych dostrzegł **oryginalne problemy naukowe**. Problemy te określił **formułując** założenia naukowe (**hipotezy**), że model membranowy może stanowić podstawę dla wyznaczania modułu Younga cienkiej powłoki rozpiętej nad ciałem nieściśliwym o znacznie mniejszym module Younga oraz że możliwa jest konstrukcja urządzenia do pletyzmo grafii powietrznej działającego przy ciśnieniach właściwych dla terapii uciskowej. **Dowiódł słuszności** swych założeń wykorzystując metody teoretyczne i doświadczalne, charakterystyczne dla dyscypliny *inżynieria mechaniczna*.

Dodatkowo, w ramach rozprawy, Doktorant zrealizował zadanie inżynierskie – wykorzystując wyniki badań, określił założenia projektowe i skonstruował (w kilku wariantach) prototyp pletyzmo grafu powietrznego działającego przy ponadstandardowych ciśnieniach.

Oczywistym wydaje się stwierdzenie, że Doktorant przy realizacji badań naukowych i zadań inżynierskich musiał wykazać się **dostateczną wiedzą** w zakresie: mechaniki, biomechaniki, termodynamiki i inżynierii mechanicznej oraz umiejętnościami w zakresie: techniki pomiarowej, analizy wyników eksperymentu, formułowania wniosków, projektowania urządzeń mechanicznych, technik komputerowych i innych.

Rozprawa została napisana starannie. Jej struktura i język są na dobrym poziomie. Pewnym cieniem kładą się dość liczne usterki interpunkcyjne (przecinki), lecz nie utrudnia to percepcji zakresu działań i toku rozumowania Doktoranta.

WNIOSKI KOŃCOWE

Po zapoznaniu się z przedstawioną mi do recenzji rozprawą doktorską jestem w pełni przekonany, że Doktorant mgr inż. Tomasz Fąs **spełnia wymagania** stawiane w *ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm. Dz. U. z 2005 r. nr 164, poz. 1365 z późn. zm.)* i **wnioskuję o dopuszczenie** Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego, a w szczególności do publicznej obrony.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę interdyscyplinarność pracy, jej wysoki poziom merytoryczny oraz efekty użytkowe, **wnioskuję o wyróżnienie** rozprawy mgr. inż. Tomasza Fąsa.

