

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Synowca

p.t.: *Badania nowych układów przepływowych pomp zatapialnych napędzanych silnikiem elektrycznym chłodzonym płaszczem wodnym*

Recenzję opracowano na zamówienie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach pismem RIE-BD/4/27/2019/2020 z dnia 14.10.2019 r., zgodnie z uchwałą Rady Wydziału z dnia 20.09.2019 r.

1. Charakterystyka formalna pracy

Opiniowana rozprawa doktorska została wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Wojciecha Kosmana, profesora nadzwyczajnego w Politechnice Śląskiej. Rozprawa liczy łącznie 131 stron, z czego 96 stron stanowi zasadniczy tekst pracy zakończony wykazem literatury obejmującym 63 pozycje. Pozostałe 35 stron, to 3 załączniki, spis treści, spis rysunków oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Rozprawa jest podzielona na 8 rozdziałów.

W krótkim rozdziale 1 przedstawiono przedmiot i cel pracy, tj. zaprojektowanie i przebadanie doświadczalne i numeryczne dwóch wersji prototypowej pompy zatapialnej, z silnikiem elektrycznym chłodzonym pompowana cieczą przepływającą wewnątrz płaszcza wodnego, w wykonaniu przeciwwybuchowym.

W rozdziale 2 dokonano przeglądu literatury dotyczącej istniejących konstrukcji pomp zatapialnych z płaszczem chłodzącym, spełniających wymagania ATEX dla maszyn w kopalniach zagrożonych wybuchem metanu i pyłu węglowego. Zwrócono uwagę na temat zewnętrznych i wewnętrznych systemów sterowania, rozwiązania elementów odprowadzających ciecz z wirnika oraz na kwestię efektywności energetycznej takich pomp.

W rozdziale 3 omówiono kolejno:

- wybór parametrów nominalnych projektowanej pompy oraz ich wpływ na kształt wirnika, prawdopodobny przebieg podstawowych charakterystyk i sprawności pompy/zespołu pompowego,
- cechy konstrukcji pomp zatapialnych w rozwiązaniach przeciwwybuchowych,

- cechy nowych rozwiązań konstrukcyjnych, będących przedmiotem omawianej rozprawy doktorskiej, w tym: uszczelnienia mechaniczne w nowym ustawieniu (odwróconym w porównaniu do klasycznego), przyłącza elektryczne oraz czujniki zabezpieczające i pomiarowe.

W rozdziale 4 przedstawiono zastosowane metody zaprojektowania części hydraulicznej pompy: wirnika, oparte na klasycznej teorii jednowymiarowej, oraz oryginalnych elementów zbierających ciecz z wirnika w postaci potrójnej spirali zbiorczej w pierwszej i podwójnej spirali zbiorczej w drugiej wersji konstrukcyjnej pompy. W obu przypadkach kanały spiralne miały ukształtowanie przestrzenne, z wylotem nachylnym pod niewielkim kątem względem osi pompy.

W rozdziale 5 opisano układ zabezpieczeń przed skutkami różnych zagrożeń dla poprawnej pracy pompy (złe podłączenie faz, przeciążenie silnika itp.), zainstalowane czujniki oraz sposób sygnalizacji zagrożeń przez zespół diod różnych kolorów. Wbudowany elektroniczny układ sterowania ma nie dopuścić do uruchomienia pompy lub ją wyłączyć w razie zagrożenia. Wbrew tytułowi rozdziału nie ma w nim informacji o autonomicznej regulacji pompy. Wspomniano natomiast o pożarach w przestrzeni korpusu silnika i pokrywy, jakie – wywołane właśnie przez elektroniczny układ sterowania – występowały podczas rozruchu.

W rozdziale 6 dość szczegółowo omówiono problemy konstrukcyjne związane z koniecznością pomiaru ciśnienia oleju w komorze między dwoma uszczelnieniami mechanicznymi. Ciśnienie to powoli ale stopniowo rośnie wskutek nieuniknionych przecieków przez dolne uszczelnienie. Przedstawiono zastosowany sposób rozwiązania tego problemu.

W krótkim rozdziale 7 omówiono badania certyfikujące zespołu pompowego drugiej wersji konstrukcyjnej, wykonane zgodnie z normą PN-EN 60079-0 i -1. Badania zostały zakończone pomyślnie poza badaniem stopnia ochrony IP, ze względu na pożar, o którym mowa w rozdziale 5, co nie pozwoliło na zakończenie procesu atestacji i na wprowadzenie na razie pompy na rynek.

W rozdziale 8 przedstawiono szczegółowe wyniki badań doświadczalnych prototypu pompy pierwszej wersji konstrukcyjnej oraz, jako porównawcze, badania czterech egzemplarzy pomp produkcji krajowej, aktualnie stosowanych w polskich kopalniach węgla kamiennego. Opisano stanowisko badawcze i przyrządy pomiarowe oraz zamieszczono zbiór charakterystyk przepływu, mocy i sprawności pompy prototypowej z wirnikami o różnych średnicach zewnętrznych (różnych stoczeniach) jak również charakterystyki badanych pomp porównawczych.

Przedstawiono ponadto wybrane wyniki analiz numerycznych układów przepływowych pomp obu wersji konstrukcyjnych, w postaci pól prędkości i ciśnień w wirnikach i spiralnych kanałach zbiorczych dla trzech różnych wydajności. Obliczenia wykonano za pomocą programu ANSYS CFX, z modelem $k - \varepsilon$ turbulencji. Wyniki symulacji numerycznych okazały się dobrze zgodne z wynikami doświadczalnymi.

W podsumowaniu (rozdz. 9) autor omówił najważniejsze wyniki zaprezentowane w rozprawie oraz sformułował wnioski końcowe.

2. Uwagi ogólne

2.1. Opiniowana rozprawa doktorska jest połączeniem pracy projektowej i badawczej, stanowiąc – zwłaszcza pod względem konstrukcyjnym, oryginalne rozwiązanie problemu naukowo-technicznego. Spełnia zatem wymagania punktów 1 i 3 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

2.2. Opiekunem naukowym doktoranta był przez wiele lat dr hab. inż. Andrzej Korczak, profesor Politechniki Śląskiej, zaś wykonanie wszystkich prac, zwłaszcza od strony elektrycznej i elektronicznej (silnik, układ sterowania) wymagało udziału także innych osób. W związku z tym w 10-ciu publikacjach wymienionych w spisie literatury oprócz doktoranta i prof. A. Korczaka są także inni współautorzy. Na wniosek recenzenta doktorant, w oświadczeniu z dnia 22.11.2019 r. potwierdzonym przez współautorów publikacji podał, że zakres prac doktoranta w całości tematu wynosił 75%; podał też, jakie części pracy zostały przez niego w całości wykonane.

2.3. Należy podkreślić, że opiniowana praca stanowi dość rzadki w rozprawach doktorskich przykład rozwiązania, określanego niegdyś jako PCR (pełny cykl rozwojowy), zawierającego wszystkie elementy – od projektu, poprzez wykonanie prototypu (tu zwłaszcza nadzór autorski) do wszechstronnego przebadania doświadczalnego i numerycznego, choć w tytule pracy są wymienione tylko badania.

2.4. Na podkreślenie zasługuje oryginalne rozwiązanie hydrauliczne pompy, tj. bezpośrednie skierowanie cieczy z przestrzennie ukształtowanych dwóch lub trzech spiralnych kanałów zbiorczych do płaszcza wodnego (w dotychczasowych rozwiązaniach rolę tę pełniły kierownice łopatkowe). Szkoda, że autor nie podkreślił wyraźniej zalet swojego rozwiązania.

2.5. Temat podjęty przez doktoranta, związany z jego zatrudnieniem w fabryce Powen-Wafapomp i wieloletnią współpracą z Politechniką Śląską, zwłaszcza z prof. A. Korczakiem, ma duże znaczenie praktyczne, ze względu na mankamenty dotychczas stosowanych w górnictwie pomp krajowych tego typu (niska sprawność i jednocześnie duża masa). Rozwiązanie tematu zawiera także ważne elementy badawcze.

2.6. Z powyższych względów zarówno podjęcie tematu, szeroki zakres prac jak również uzyskane wyniki oceniam pozytywnie, pomimo pewnych niepowodzeń związanych z funkcjonowaniem elektronicznego układu sterowania pracą prototypowego zespołu pompowego.

2.7. Jest przyjęte w pracach doktorskiej, że doktorant stawia na początku pracy tezę, którą następnie mniej lub bardziej przekonująco udowadnia. Autor opiniowanej pracy nie postawił takiej tezy, choć dałoby się to dość łatwo zrobić. Można jednak przyjąć, że cała praca jest zarówno tezą jak i jej uzasadnieniem.

3. Uwagi szczegółowe

3.1. Drobne uwagi merytoryczne

Opiniodawca nie znalazł w pracy poważniejszych błędów merytorycznych. Uwagi zamieszczone w tym punkcie są więc na ogół wskazaniem pewnych mankamentów związanych z nieprecyzyjnym opisem, niewłaściwymi lub niejednoznacznymi oznaczeniami poszczególnych wielkości i brakiem uzasadnień lub komentarzy do poszczególnych stwierdzeń autora. Warto je uwzględnić w dalszych pracach lub publikacjach.

3.1.1. W pracy powinien się znaleźć wykaz oznaczeń. Pozwoliłoby to prawdopodobnie na uniknięcie niejednoznaczności, np. dotyczących sprawności pompy, która na rysunkach 3, 61...65 oraz we wzorze (2) jest oznaczona przez η (zgodnie z normami PN, EN, ISO), na rysunkach 67...71 i 89...103 oraz w tablicach załącznika 1 – przez η_p , zaś w tablicy 6 i na rysunku 81 – przez η_{pom} . Podobnie jest z różnymi oznaczeniami wyróżnika szybkobieżności (patrz p. 3.2 recenzji, s. 16-18) oraz mocy pompy i mocy zespołu pompowego (p. 3.1.2 recenzji).

3.1.2. Podstawowe charakterystyki pompy, to: charakterystyka przepływu $H(Q)$, mocy na wale $P(Q)$ (najczęściej wyznaczanej nie bezpośrednio, lecz przeliczanej ze wzoru $P = P_{el}\eta_s$) i charakterystyka sprawności $\eta(Q)$ – wynikająca z dwóch poprzednich. Tymczasem z prostych przeliczeń wynika, że moce podane w tablicy 5 (s. 83) i na rysunkach 61, 65 są to moce elektryczne P_{el} (pobierane przez silnik z sieci), a nie moce na wale P , podczas gdy sprawności na tych rysunkach dotyczą pompy, nie zespołu pompowego. Pomijając niekonsekwencję oznaczeń, w tablicy 5 należało podać dwie wartości: η i η_a (sprawność zespołu pompowego) i wyraźnie napisać, że $\eta = \eta_a/0,84 = \rho g Q H / (0,84 P_{el})$. Ułatwiłoby to czytanie pracy.

3.1.3. Należało wyjaśnić, czy sprawność silnika $\eta_s = 0,84$ (s. 84) uwzględnia straty w jego płaszczu chłodzącym, czy też obciążono nim sprawność pompy, tj. układu hydraulicznego od wlotu do króćca ssawnego aż do wylotu z króćca tłocznego.

3.1.4. W tablicy 5 i w jej tytule należało podać, że zamieszczone w niej wartości, to parametry optymalne Q_{opt} , H_{opt} i η_{max} dla poszczególnych stoczeń wirnika; zamiast „h” powinno być właśnie η_{max} .

3.1.5. W całej pracy, poza tablicą 5 oraz rysunkami 61 i 65, używa się niewłaściwego symbolu mocy „N”, podczas gdy w normach polskich i międzynarodowych oraz powszechnie w publikacjach, od ponad 60 lat używa się symbolu P .

3.1.6. Podana na stronach 10, 92 i 103 informacja, że sprawność badanej pompy prototypowej jest o 15 punktów procentowych wyższa od sprawności analogicznych

pomp dostępnych na rynku, może dotyczyć tylko stosowanych w górnictwie pomp krajowych. Ponadto podana w tablicy 1 wartość $\eta_a = 0,65$ (65%) jest zbyt wysoka. Z prostego przeliczenia wykorzystującego wartości podane w tablicy 5 i odczytane z rysunków 61, 65 wynika, że dla pompy o parametrach $Q_n = 35 \text{ m}^3/\text{h}$ i $H_n = 13 \text{ m}$, a więc z wirnikiem o średnicy zewnętrznej $d_2 = 120,2 \text{ mm}$, jest $P_{el} \approx 2,15 \text{ kW}$, a stąd $\eta_a = 0,577$. To zgadza się z rysunkiem 64 z którego odczytano, że dla w/w parametrów jest $\eta \approx 0,69$, skąd $\eta_a \approx 0,84 \cdot 0,69 = 0,58$. Jest to sprawność zbliżona do sprawności pomp Flygt (tabl. 1 oraz materiały katalogowe firmy Xylem/Flygt).

W przypadku pomp będących przedmiotem rozprawy sprawność ma znaczenie raczej drugorzędne, bo najważniejsza jest niezawodność i bezpieczeństwo, ale podawane informacje powinny być możliwie dokładne.

3.1.7. Każde badanie doświadczalne powinno się kończyć oszacowaniem całkowitej niepewności wyznaczenia podstawowych wielkości, zwłaszcza wysokości podnoszenia i sprawności, zgodnie z normą PN-EN ISO 9906:2012. W pracy nie wykonano takiego rachunku. Nie podano także klas dokładności przepływomierza oraz miernika mocy elektrycznej.

3.1.8. W opiniowanej rozprawie wielokrotnie mówi się o dwóch konstrukcjach pomp, różniących się m.in. liczbą spiralnych kanałów zbiorczych (2 lub 3) i sposobem wyprowadzenia króćca tłoczego. Dopiero na stronie 101 podano informację, że prototyp drugiej pompy nie został jeszcze wykonany. Czy planuje się jego wykonanie?

3.1.9. Warto było, choćby pokrótce, skomentować wyniki analiz numerycznych rozkładów prędkości i ciśnień pokazanych na rysunkach 76...87.

3.1.10. Autor tłumaczy (s. 98-99) zawyżoną, w porównaniu do pomiarów, sprawność pompy prototypowej pominięciem straty tarcia tarcz wirujących. Rozbieżności można było uniknąć dołączając do modelu matematycznego jeden ze sprawdzonych wzorów pół empirycznych na wartość tej straty.

3.2. Uwagi porządkowe

Recenzowana praca doktorska, mająca staranną postać graficzną, została jednak zredagowana dość niefrasobliwie i sprawia wrażenie, jakby doktorant nie przeczytał jej ani razu po napisaniu.

Poniżej wymieniono ważniejsze, spośród wielu zauważonych przez opiniodawcę, usterki i nieścisłości, pomijając drobne błędy stylistyczne i tzw. literówki. Podane przy numerach stron wskaźniki liczbowe dotyczą numerów wierszy, licząc od góry lub od dołu strony.

- 1, tytuł – „...*silnik elektryczny chłodzony płaszczem wodnym*..”, to zbyt duży skrót myślowy; silnik może być chłodzony cieczą przepływającą między jego korpusem a płaszczem wodnym, ale to wydłużyłoby tytuł – można było

- więc napisać po prostu: ...silnikiem elektrycznym z płaszczem wodnym
- 12² – „Przedmiotem pracy jest pompa...”; oczywiście przedmiotem pracy jest zaprojektowanie i przebadanie doświadczalne i numeryczne prototypu pompy, zwłaszcza jej części hydraulicznej
 - 12¹²⁻¹⁴ – „Wnioski uzyskane w trakcie realizacji badań były weryfikowane na zrealizowanym projekcie pompy...”; wnioski to końcowy, podsumowujący całość badań fragment pracy. Poprawniej byłoby np.: Założenia projektowe zostały zweryfikowane na podstawie badań doświadczalnych i numerycznych, a podsumowanie całości prac zawarto we wnioskach
 - 13₅ – w polskiej literaturze technicznej zamiast „kierownica spiralna” stosowana jest powszechnie nazwa „spiralny kanał zbiorczy” albo „spirała zbiorcza” (każda kierownica ma początkowy odcinek w kształcie spirali, zwykle logarytmicznej)
 - 16-18 – wyróżnik szybkobieżności był i bywa różnie oznaczany, także w polskiej literaturze technicznej; przynajmniej jednak, w jednej publikacji powinno się używać jednego oznaczenia. Tymczasem na rysunku 2 i stronie 16₂ jest on oznaczony przez n_{sq} , na rysunkach 3, 4 – n_Q , zaś we wzorze (10) na stronie 59 – n_q ; nigdzie też nie podano jego wartości, która dla danej pompy wynosi $n_q \approx 41$
 - 17-99 – w całej pracy konsekwentnie stosowane jest sformułowanie: „Na Rysunek...(np. podano)” (mianownik), zamiast: „na rysunku..” (miejscownik)
 - 19₈ – w podpisie pod rysunkiem 4, zamiast „podstawowe charakterystyki” powinno być: „charakterystyki mocy”
 - 27₄ – w normie PN-EN 60079-1 używane są nazwy „złącze ognioszczelne” i „ścieżka ogniowa”, nie „szczelina ogniowa”
 - 28, rys. 11, 12 – brak wyjaśnienia symboli (oznaczeń) L1...L9
 - 36₉ – „Na metodach tych bazuje się wyznaczając łopatkę...”; można wyznaczać kształt łopatki lub projektować łopatkę
 - 42₄ – istnieją raczej dwa sposoby, nie dwie teorie wyznaczania średnicy d_3 ; nie podano zresztą, co to jest średnica d_3 , nie ma jej też na rysunkach 24, 25
 - 49₆₋₈ – dwa sąsiednie zdania powinny być przestawione, bo w obecnym ustawieniu nie mają sensu (wzrost spadku ciśnienia z kwadratem wydajności nie może powodować wzrostu sprawności pompy)
 - 53_{4,6} – najpierw powinno być: na rysunku 38b, a dopiero potem – na rysunku 38a
 - 57¹⁴ – charakterystyka mocy może być nieprzeciążalna, nie: „nieprzeciążana”
 - 59₆ – w podpisie pod rysunkiem 40 należało dodać, że pokazane charakterystyki są przykładowe i nie dotyczą badanej pompy
 - 68_{4,5} – bardzo niezręcznie sformułowane zdanie – do wzoru (13) podstawia się wartości liczbowe wielkości, a nie „wymiaru w wielkościach”
 - 70; 71; rys. 47 – symbolem ciśnienia jest „ p ” (mała litera), nie „ P ” (duża litera)
 - 81; 82; rys. 58, 59 – błąd względny dla przetwornika ciśnienia o numerze ...106 jest 10 razy większy niż dla przetwornika ...105; czy to tylko pomyłka?

- 84 – w prawym górnym rogu rysunku 61 zamiast $P_{el}[0,1 \text{ kW}]$ powinno być $10P_{el}$; to samo dotyczy rysunku 65
- 81-84; rys. 61-65 – należało podać średnice d_2 dla poszczególnych krzywych
- 94³ – powinno być: „wykonano analizę energetyczną” (lub analizę energochłonności); nie jest to analiza ekonomiczna
- 98 – w podpisie pod rysunkiem 81 trzeba dodać, że chodzi o pompę pierwszej konstrukcji
- 102^{4,5} – straty miejscowe są nie tylko w pompie pierwszej konstrukcji; będą one także w pompie drugiej konstrukcji, choć zapewne trochę mniejsze
- 104-107 – niekonsekwentnie sporządzony wykaz literatury; np. w jednych pozycjach są pełne imiona autorów, w innych – ich pierwsze litery; w niektórych publikacjach są numery stron, w innych nie, itp.
- 108-130 – uwagi do tablic w załączniku 1:
 - brak wymiaru (mm) przy średnicy d_2 ,
 - „ h [m]” w nagłówku – co to za wielkość?
 - „ v [m/s]” w nagłówku – co to za prędkość? ;
 gdyby był wykaz oznaczeń, prawdopodobnie nie byłoby tych pytań.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

1. Opiniowana rozprawa dotyczy ważnego praktycznie zagadnienia dostarczenia górnictwu węglowemu wysokosprawnych, niezawodnych i lekkich pomp zatapialnych, mogących pracować w atmosferach stwarzających zagrożenia wybuchowe.
2. Doktorant jest autorem ok. 75% całości prac projektowych i badawczych, dotyczących dwóch wersji konstrukcyjnych całkowicie nowych pomp wymienionych w punkcie 1 (wg jego oświadczenia, o którym mowa w uwadze ogólnej 2.2). Reszta prac była związana zwłaszcza z nieuniknionym udziałem specjalistów od elektrotechniki i elektroniki oraz technologów.
3. Na podkreślenie zasługują oryginalne rozwiązania konstrukcyjne obu pomp (tj. prototypu pierwszej i projektu drugiej) jak również duży nakład pracy doktoranta przy opracowaniu obu projektów i wykonaniu wszechstronnych badań doświadczalnych i numerycznych.
4. Rozprawa jest starannie opracowana graficznie i nie zawiera w zasadzie poważniejszych błędów merytorycznych, aczkolwiek pozostawia sporo do życzenia pod względem redakcyjnym ze względu na liczne usterki formalne.
5. Doktorant wykazał umiejętność samodzielnego rozwiązania poważnego i pracochłonnego zadania naukowo-technicznego. Uwagi krytyczne dotyczą usterek głównie formalnych i nie umniejszają merytorycznej wartości rozprawy. Zamieszczono je po to, aby doktorant uniknął podobnych usterek w przyszłych pracach i publikacjach.

6. Reasumując mogę uznać, że dysertacja mgr inż. Tomasza Synowca p.t.: *Badania nowych układów przepływowych pomp zatapialnych napędzanych silnikiem elektrycznym chłodzonym płaszczem wodnym* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym i może być dopuszczona do publicznej obrony.

