

Adam Olejnik, Przemysław Chrabąszcz

Kmdr dr inż. Adam Olejnik
Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte
81 – 103 Gdynia 3 ul. Śmidowicza 69
Zakład Technologii Nurkowania i Prac Podwodnych
tel. +58 626 27 46, fax. +58 625 38 82
e-mail: aolej@wp.pl

Por. mar. mgr inż. Przemysław Chrabąszcz
Dywizjon Okrętów Wsparcia
3 Flotylla Okrętów MW RP
81 – 103 Gdynia ul. Rondo Bitwy pod Oliwą
e-mail. construct@o2.pl

**BADANIA UKŁADU NAPĘDOWEGO PROTOTYPU ZDALNIE
STEROWANEGO POJAZDU PODWODNEGO**

W Zakładzie Technologii Nurkowania i Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni (ZTNIPP) opracowano i zbudowano prototyp miniaturowego zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego (MROV „Gammarus”). Koncepcję i budowę pojazdu opisano w poprzednich publikacjach [3]. Obecnie pojazd jest wykorzystywany do celów dydaktycznych i eksperymentalnych. Aktualne badania dotyczą układu napędowego pojazdu.

W niniejszym artykule przedstawiono metodykę badania układu napędowego pojazdu i wyniki wstępnych eksperymentów.

Słowa kluczowe: *technologia prac podwodnych, bezzałogowy pojazd podwodny*

ROV: STUDY OF A PROTOTYPE DRIVE SYSTEM

In the Department of Diving Gear and Underwater Work Technology at the Naval University of Gdynia (ZTNiPP), the prototype of a Mini class of ROV (remotely operated underwater vehicle), named MROV Gammarus, has been designed and built. At present, the vehicle is used for educational and experimental purposes; the idea and construction of the vehicle was described in previous publications [3]. The current research concerns the drive system of the vehicle. The article presents the methodology of the research of the vehicle's drive system and the results of initial experiments.

Keywords: *underwater technology, unmanned underwater vehicle*

WSTĘP

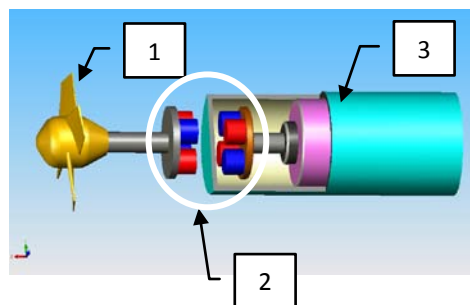
Naturalnym środowiskiem pracy pojazdu typu UUV (z j. ang. unmanned underwater vehicle) jest środowisko wodne. Stwarza to określone wymagania konstrukcyjne polegające na zbudowaniu urządzenia, które będzie spełniało założone dla niego funkcje celu oraz będzie odporne na zagrożenia panujące w przewidzianym dla niego środowisku działania. Jednym z zadań stawianych konstrukcji pojazdu typu ROV jest odporność na zalanie, co ma uchronić jego wyposażenie pokładowe przed uszkodzeniami. Szczególnie na tego typu usterkę narażone są urządzenia peryferyjne pojazdu, najbardziej takie jak ramię manipulatora czy jego układ napędowy. Są to te elementy konstrukcyjne, które ze względu na konieczność przenoszenia napędu trudno uszczelnić a przez to stają się potencjalnym słabym punktem konstrukcji. Powyższy problem może być realizowany na wiele sposobów, począwszy od zastosowania uszczelnień labiryntowych po zastosowanie układów hydraulicznych. Na przykład w pojeździe konstrukcji francuskiej „Super Achille” zastosowanie ma ochrona przed zalaniem polegająca na umieszczeniu wszystkich bloków wykonawczych układu napędowego w specjalnym oleju, który poprzez odpowiednią membranę wyrównuje swoje ciśnienie z aktualnym ciśnieniem otoczenia pojazdu na tej drodze nie dopuszczając do zalania układu napędowego. W ostatnim czasie można zauważyć tendencję do całkowitej separacji części napędowej (silniki) z częścią wykonawczą układu napędowego (śruby) poprzez zastosowanie sprzęgieł magnetycznych. Z tych powodów projektując pojazd miniROV „Gammarus” podjęto decyzję o zastosowaniu tego typu rozwiązania do przeniesienia napędu. Po opracowaniu konstrukcji i zbudowaniu pojazdu przystąpiono do realizacji szeregu eksperymentów w celu weryfikacji czy zbudowana konstrukcja spełnia stawiane jej wymagania [1,3]. Jednym z etapów tych prac były badania układu napędowego opartego o sprzęgło magnetyczne. Przebieg i wyniki tych eksperymentów są przedmiotem tej publikacji.

1. CEL I METODA BADAŃ

Celem badania układu napędowego pojazdu miniROV „Gammarus” było sprawdzenie, czy założone w warunkach taktyczno technicznych rozwiązanie przeniesienia napędu spełnia swoje zadanie. Badanie polegało na określeniu siły naporu pędników w funkcji poboru mocy ze źródła napędu. Eksperyment zrealizowano jako dwie próby pojazdu na uwięzi oddzielnie dla pędnika pionowego i dla jednego pędnika poziomego. Badania realizowano w basenach nurkowych Ośrodka Szkolenia Nurków i Płetwonurków Wojska Polskiego w Gdyni.



A



B

Rys. 1. Pojazd podwodny „Gammarus” (A), element układu napędowego pojazdu – pędnik poziomy (B) – obiekt badań. 1 – śruba napędowa, 2 – sprzęgło magnetyczne, 3 – silnik w wodoszczelnej obudowie.

INTRODUCTION

The aquatic environment is the natural work environment for UUVs (unmanned underwater vehicles). This imposes certain design requirements involving building a device that will serve its intended functions and will be resistant to the threats present in its operating environment. One of the challenges in designing an ROV is the necessity for its construction to be watertight in order to protect the on-board equipment from damage; the vehicle's peripherals (especially the manipulator arm and its drive system), due to the need to transmit the drive, are difficult to seal and thus become a potential failure point of the structure. This problem can be solved in many ways, ranging from the use of labyrinth seals to the use of hydraulic systems. For example, in the French construction of the *Super Achille*, all the parts of the drive system are placed in oil, which thanks to a special membrane equalizes its pressure with the current ambient pressure of the vehicle and thus prevents flooding the drive system. More recently, designers have turned to magnetic couplings to separate the drive motors from the moving portion of the drive system. It was this latter system which the designers of the miniROV *Gammarus* decided to utilize. After developing the design and constructing the vehicle, a series of experiments were initiated in order to verify whether it met the required conditions [1,3]. One of the stages of this work was a study of the magnetic drive system. The course and results of these experiments are the subject of this publication.

1. AIM AND METHOD OF STUDY

The aim of the study of the miniROV *Gammarus*' drive system was to check whether the power transmission solution, applied in tactical-technical conditions, actually worked. Conducted at The Polish Army Training Centre for Divers (Gdynia), the study was designed to determine the force transmitted to the thrusters as a function of power intake from the prime mover; separate tests were carried out on the vertical and horizontal thrusters.

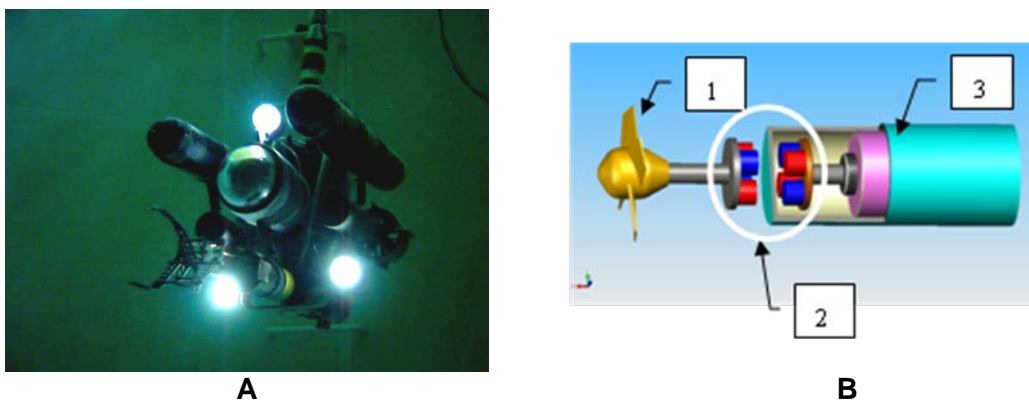
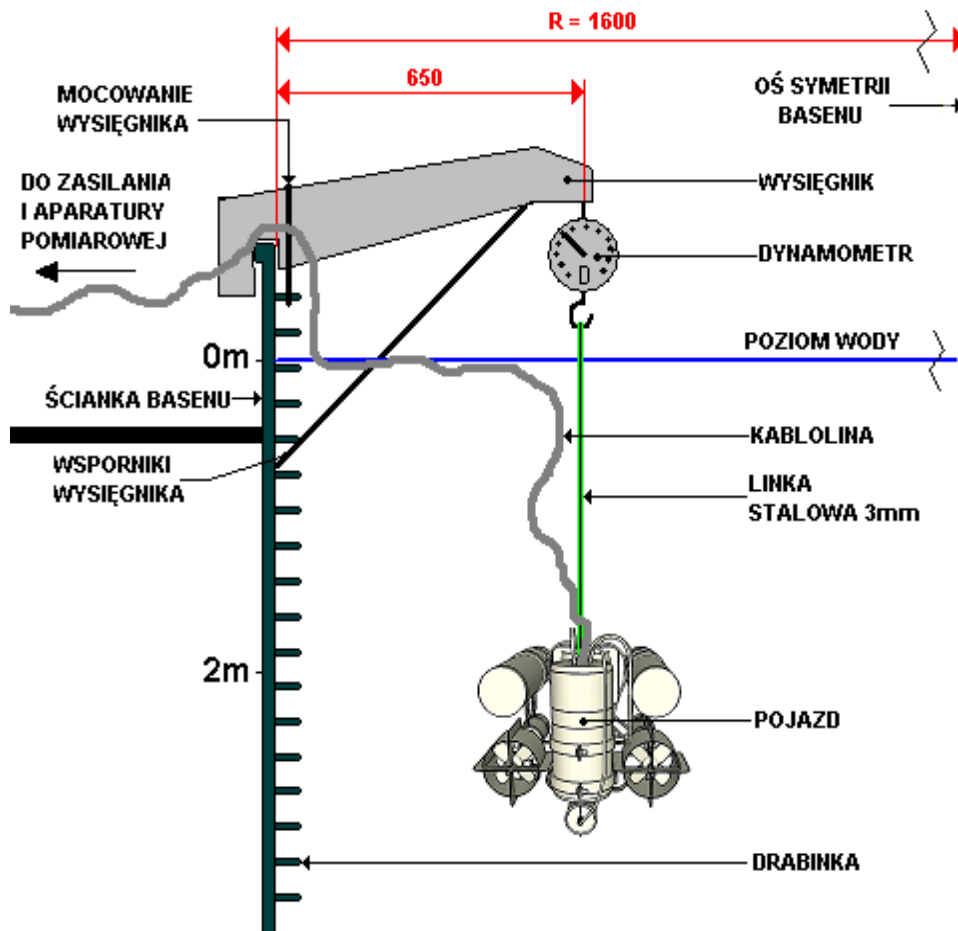


Fig. 1. Underwater vehicle *Gammarus* (A), vehicle's drive system elements – horizontal thruster (B) – subject of study. 1 – propeller, 2 – magnetic coupling, 3 – watertight motor housing.



Rys. 2. Stanowisko badawcze wykorzystane podczas prób pędnika pionowego.

Podczas badania pędnika pionowego zastosowano stanowisko badawcze przedstawione na rysunku powyżej. Do zamocowania dynamometru do pomiaru siły naporu zastosowano specjalnie zaprojektowany wsięgnik, linka łącząca przyrząd pomiarowy z pojazdem była dopasowana w taki sposób, aby nie wpływać na wynik pomiaru na przykład poprzez rozciąganie. Zastosowano linkę stalową o średnicy 3 mm. Umieszczenie pojazdu na głębokości 2 metrów niwelowało wpływ powierzchni swobodnej wody, ponadto wielkość basenu w stosunku do gabarytów pojazdu również zapewniała odpowiednie warunki prób. Aby pojazd osiągnął głębokość wyznaczoną długością linki, przed zanurzeniem dociążono go ołowianym balastem tak, że utracił pływalność dodatnią. Po zanurzeniu pojazdu odczytano na dynamometrze wskazanie odpowiadające jego ujemnej pływalności i wytarowano wagę zerując jej wskazania. W trakcie badania rejestrowano kolejne nastawy nadajnika sterującego pracą regulatora PMW (pulse width modulation – sterowanie długością impulsu), odczytywano siłę naporu z dynamometru i rejestrowano natężenie prądu źródła zasilania oraz jego napięcie.

Podczas badania pędnika poziomego zastosowano stanowisko badawcze przedstawione na kolejnym rysunku (Rys. 3). W tym przypadku pojazd został umieszczony w basenie nurkowym na głębokości 0,5 metra. Zastosowano ten sam wsięgnik i linkę a dodatkowym elementem był wspornik z bloczkiem umieszczony na tej samej głębokości, co pojazd oraz linka utrzymująca pojazd na zadanej głębokości. Podczas prób realizowano pomiary tych samych parametrów jak w przypadku próby pędnika pionowego.

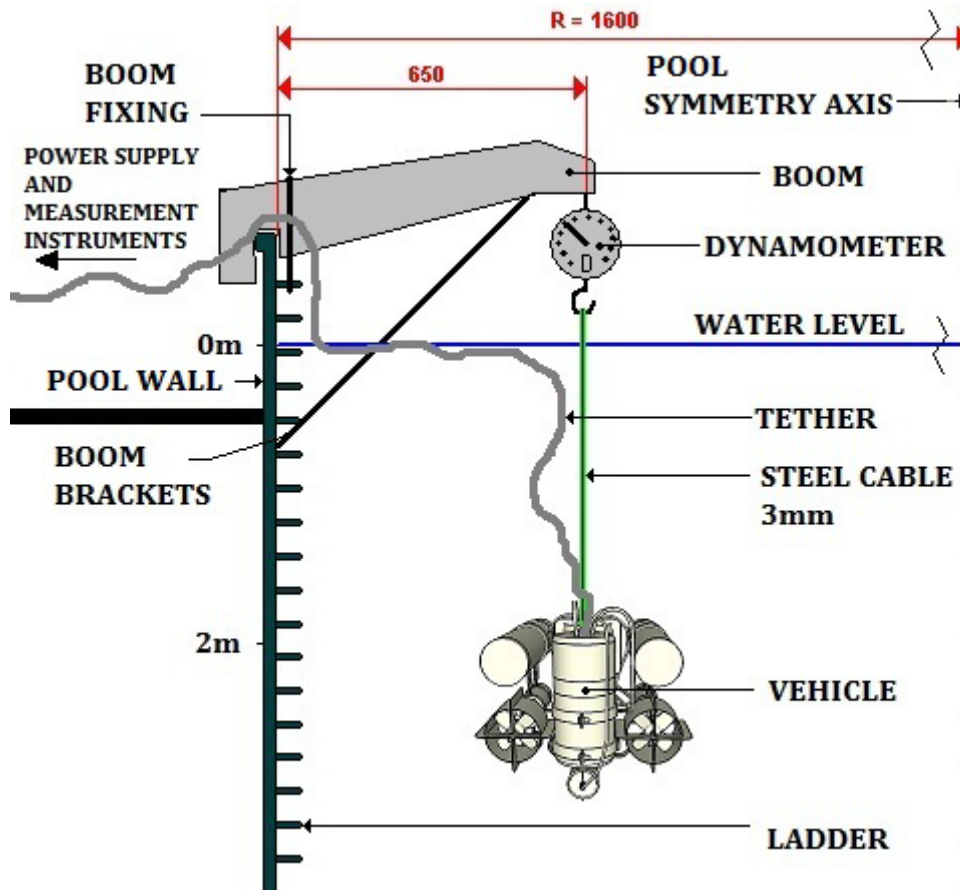
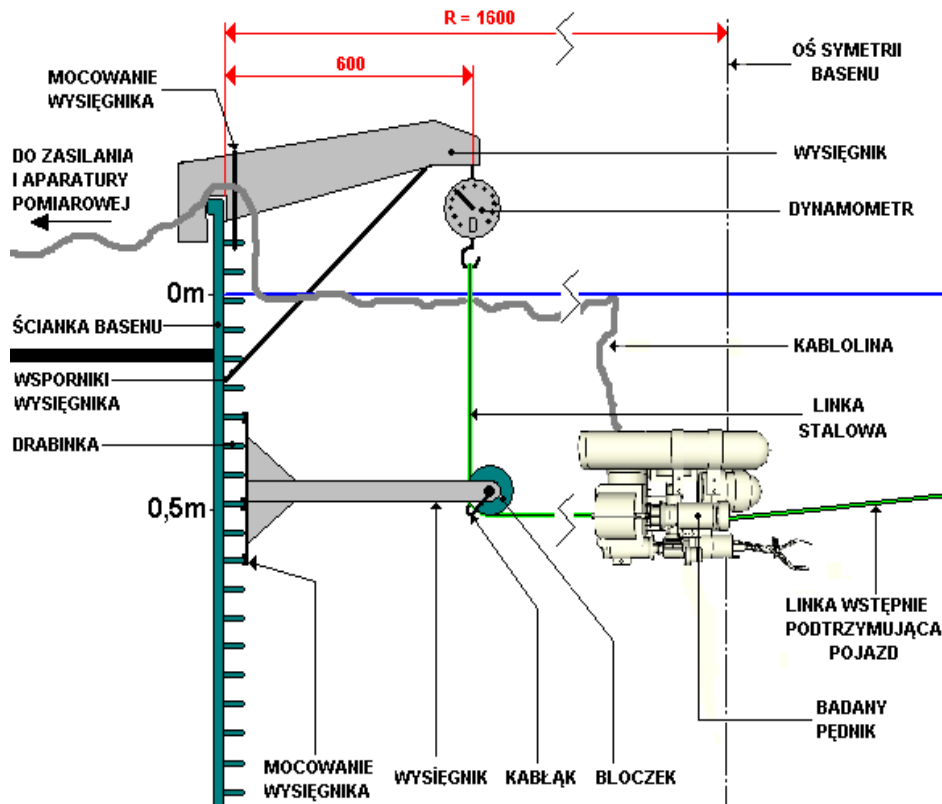


Fig. 2. The test bench used for vertical thruster tests.

During the test of the vertical thruster, the test bench shown in the figure above was used. For attaching the dynamometer which measured the thrust force, a specially designed boom was used; the cord connecting the measuring device and the vehicle was selected in order not to affect the measurement result e.g. by stretching. The vehicle, suspended on a 3 mm thick steel cable, was placed at a depth of 2 meters in order to eliminate the influence of the free surface of water; importantly, the size of the tank in relation to the dimensions of the vehicle also provided adequate testing conditions. To enable the vehicle to reach the depth determined by the length of the cord, it had been loaded down with lead ballast, so that positive buoyancy was lost. After immersion of the vehicle, its negative buoyancy index was read from the dynamometer and its weight was reset. During the study, subsequent adjustments of the transmitter controlling the work of a PWM regulator (pulse width modulation), the thrust force from the dynamometer, and the current strength and voltage of the power source current were recorded.

During the horizontal thruster test, the test bench shown in the next figure (Figure 3) was used. In this case, the vehicle was placed in the diving pool at the depth of 0.5 m. The same boom and cable were used; a block placed at the same depth as the vehicle, and a cord keeping the vehicle at the desired depth were additional elements. During the tests, the same measurements of the same parameters as in the case of the vertical thruster tests were carried out.



Rys. 3. Stanowisko badawcze wykorzystane podczas prób pędnika poziomego.

Podczas prób na podstawie pomiarów natężenia i napięcia zasilania określano moc dostarczoną do układu napędowego pojazdu uwzględniając moc spożytkowaną na zasilanie elektroniki pokładowej i oświetlenia:

$$N = P - P_1 \quad (1)$$

gdzie:

- N moc dostarczona do układu napędowego [W],
- P moc pobierana ze źródła [W],
- P₁ moc pobierana ze źródła spożytkowana na zasilanie elektroniki pokładowej i oświetlenie [W].

Moc P_1 określano na podstawie pomiarów mierząc prąd i napięcie źródła przy włączonym pojeździe, ale niepracującym układzie napędowym. Siłę naporu pędnika (T) odczytywano z dynamometru w [kg] i przeliczano ją na [N].

2. WYNIKI EKSPERYMENTU

Przykładowe wyniki pomiarów i wykonanych na ich podstawie z zależności (1) obliczeń przedstawiono w Tabeli 1 i w Tabeli 2.

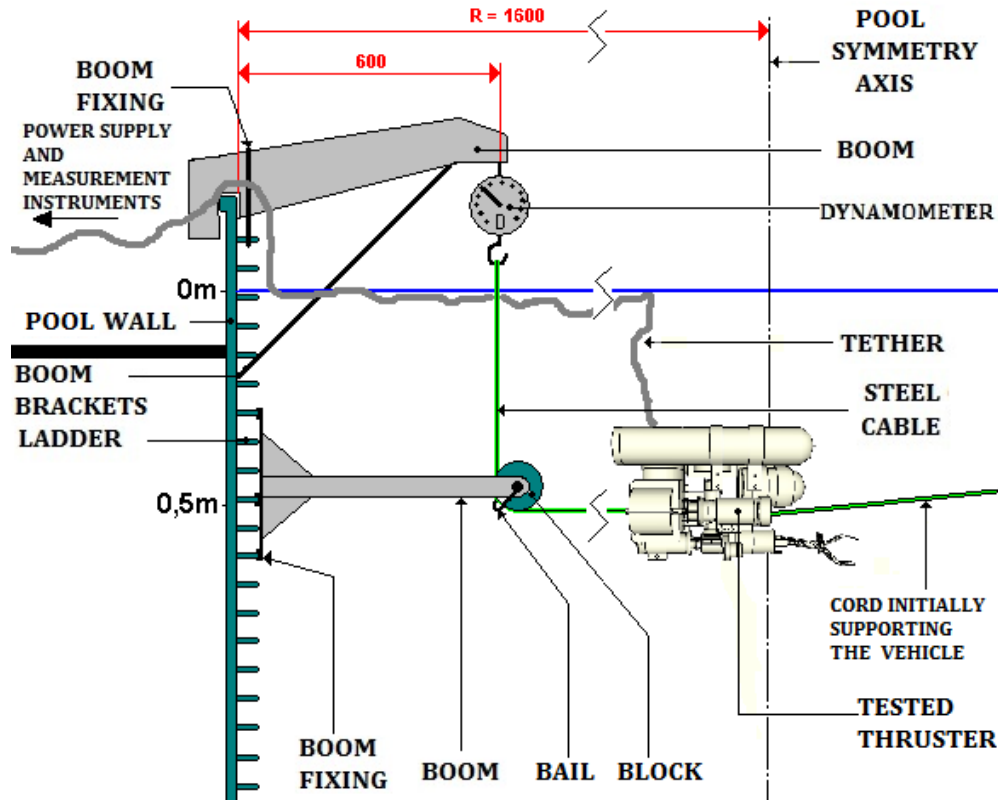


Fig. 3. The test bench used for horizontal thruster tests.

During the tests, on the basis of the current strength and voltage measurements, the power brought to the drive system of the vehicle was determined, taking into account the power spent to supply on-board electronics and lighting:

$$N = P - P_1 \quad (1)$$

where:

- N - power supplied to the drive system [W],
- P - power taken from the source [W],
- P_1 - power taken from the source spent to supply on-board electronics and lighting [W].

Power P_1 was determined by measuring the current and source voltage with the vehicle turned on, but its drive system turned off. The thrust force of the thruster (T) was read from the dynamometer in [kg] and converted into [N].

2. TEST RESULTS

Sample test results and calculations made on the basis of their relation (1) are shown in Table 1 and Table 2.

Tabela 1.

Przykładowe wyniki eksperymentu dla pędnika pionowego

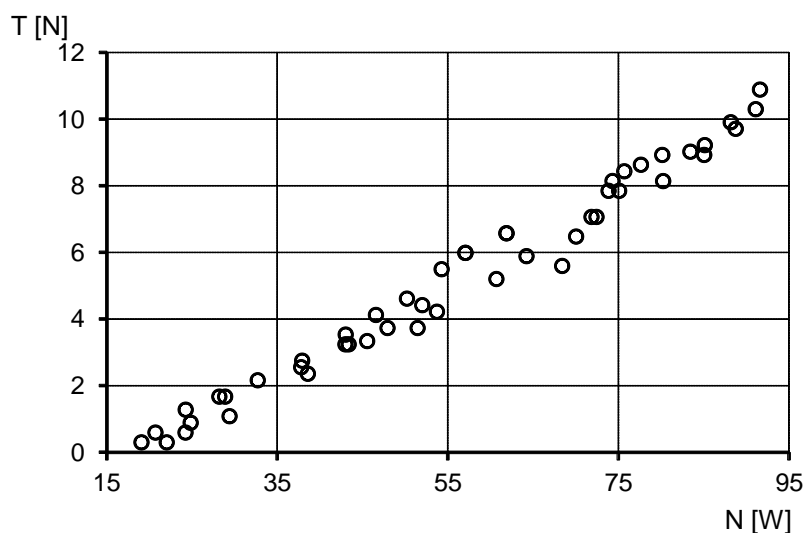
Lp	Natężenie prądu	Napięcie	Wskazanie dynamometru	Moc pobierana ze źródła (P)	Moc dostarczona do napędu (N)	Siła naporu pędnika (T)
	[A]	[V]	[kg]	[W]	[W]	[N]
1	0,2	15,66	0	3,13	0	0
...
18	7,5	12,63	1,11	94,73	91,59	10,89

Tabela 2.

Przykładowe wyniki eksperymentu dla pędnika poziomego

Lp	Natężenie prądu	Napięcie	Wskazanie dynamometru	Moc pobierana ze źródła (P)	Moc dostarczona do napędu (N)	Siła naporu pędnika (T)
	[A]	[V]	[kg]	[W]	[W]	[N]
1	0,27	15,65	0	4,23	0	0
....
18	7,45	12,7	1,33	94,62	94,62	13,05

Na podstawie powyższych danych określono moc dostarczoną do układu napędowego w zależności od nastawy regulatora i określono odpowiadającą jej siłę naporu pędnika pojazdu. Zbiorcze wyniki dla jednej serii pomiarów w postaci rozkładu siły naporu (T) w funkcji mocy dostarczonej do napędu (N) przedstawiono na rysunku poniżej.



Rys. 4. Uzyskane wyniki eksperymentu dla próby pędnika pionowego (dane surowe).

Table 1.

Sample test results for the vertical thruster

No	Current strength	Voltage		Power taken from the source (P)	Power supplied to the drive system (N)	Thrust force of the thruster (T)
	[A]	[V]	[kg]	[W]	[W]	[N]
1	0.2	15.66	0	3.13	0	0
...
18	7.5	12.63	1.11	94.73	91.59	10.89

Table 2.

Sample test results for the horizontal thruster

No	Current strength	Voltage	Dynamometer value	Power taken from the source (P)	Power supplied to the drive system (N)	Thrust force of the thruster (T)
	[A]	[V]	[kg]	[W]	[W]	[N]
1	0.27	15.65	0	4.23	0	0
....
18	7.45	12.7	1.33	94.62	94.62	13.05

On the basis of the above data, the power supplied to the drive system was determined, depending on the controller settings, and a corresponding vehicle's thrust force was set. Summary results for one series of measurements in the form of the distribution of thrust force (T) as a function of power supplied to the drive (N) is shown in the figure below.

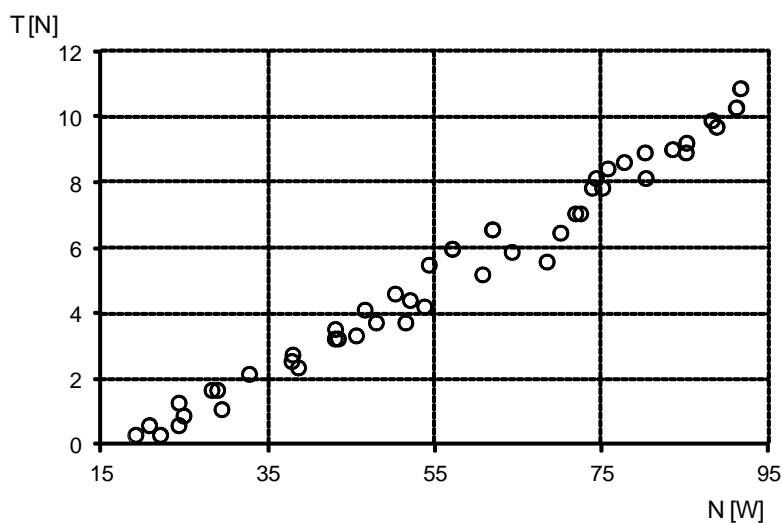
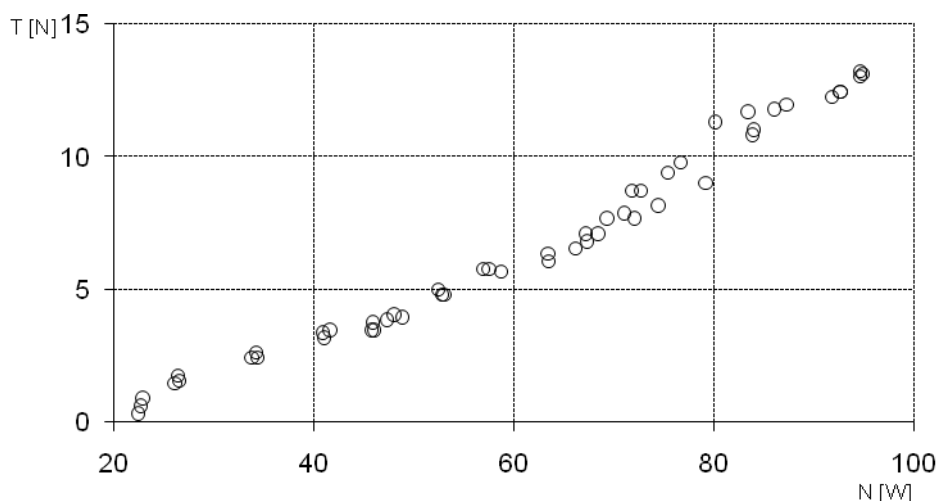


Fig. 4. The results of the vertical thruster test (raw data).



Rys. 5. Uzyskane wyniki eksperymentu dla próby pędnika poziomego (dane surowe)

2.1 OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

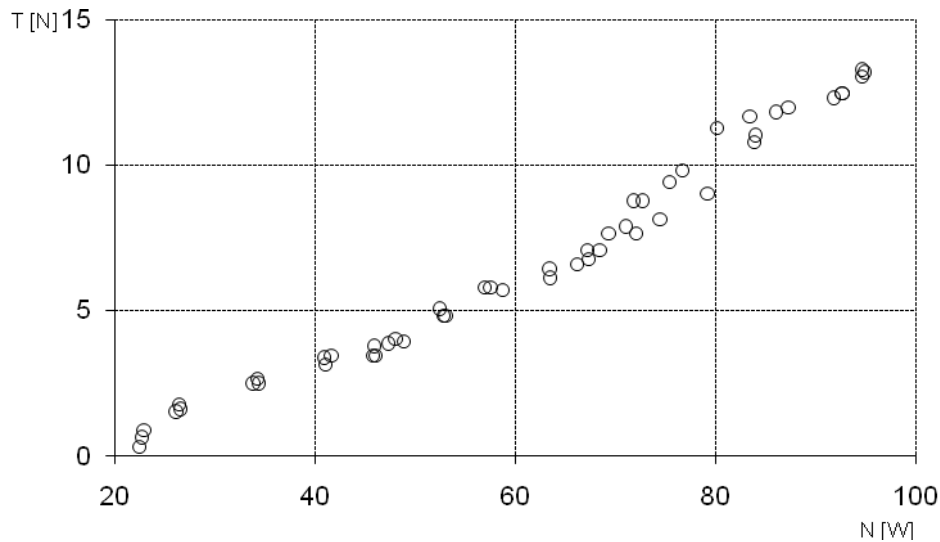
Otrzymany rozkład siły naporu (T) w funkcji poboru mocy dostarczonej do napędu (N) ($T = f(N)$) poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem statystyk opisowych oraz na drodze określania funkcji regresji. Badania prowadzono w kierunku sprawdzenia czy wzrost mocy dostarczonej do napędu ma wpływ na wzrost siły naporu, co świadczy o prawidłowym przeniesieniu napędu przez opracowany układ sprzęgieł magnetycznych. Wobec powyższego wyznaczenie na podstawie uzyskanych wyników zależności funkcyjnej wskazującej na dodatnią korelację pomiędzy zmienną niezależną – moc, a zmienną zależną – napór, będzie pozytywnym wynikiem badań. Na podstawie rozkładu otrzymanych wyników (Rys. 4, Rys. 5) można stwierdzić, że do określenia stopnia i rodzaju korelacji pomiędzy badanymi zmiennymi właściwe jest zastosowanie współczynnika korelacji Pearsona [2,4]. Współczynnik ten liczy się z zależności:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{s(x)s(y)} \quad (2)$$

gdzie:

- r_{xy} - współczynnik korelacji Pearsona,
- $\text{cov}(x, y)$ - kowariancja wartości zmiennych x i y ,
- $s(x)$ - odchylenie standardowe zmiennej x ,
- $s(y)$ - odchylenie standardowe zmiennej y .

Powyższy współczynnik jest miarą unormowaną przyjmującą wartości z przedziału $-1 \leq r_{xy} \leq 1$. Jeśli jego wartość jest większa od 0,5 to pomiędzy badanymi cechami zachodzi wyraźna korelacja [4].



Rys. 5. The results of the horizontal thruster test (raw data).

2.1 ANALYSIS OF TEST RESULTS

The resulting distribution of thrust force (T) as a function of power supplied to the drive (N) ($T = f(N)$) were analyzed using descriptive statistics and by determining the regression function. The study was conducted to check whether an increase in power supplied to the drive caused an increase in thrust force, which would indicate proper power transfer by the developed system of magnetic couplings. Therefore, a functional dependence determined on the basis of the results indicating a positive correlation between the independent variable - the power, and the dependent variable - the pressure, will constitute a positive test result. On the basis of the distribution of results (Figure 4, Figure 5), it can be stated that to determine the degree and type of correlation between the studied variables, it is appropriate to use Pearson's correlation coefficient [2,4]. This coefficient is calculated from the formula:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{s(x)s(y)} \quad (2)$$

where:

- r_{xy} - Pearson's correlation coefficient,
- $\text{cov}(x, y)$ - covariance of the two variables x and y,
- $s(x)$ - standard deviation of variable x,
- $s(y)$ - standard deviation of variable y.

Interpretacja ta odnosi się również do wartości ujemnych współczynnika. Jeżeli $r_{xy} = |1|$ to zależność korelacyjna przechodzi w zależność funkcyjną, natomiast, jeśli $r_{xy} = 0$ to świadczy to o zupełnym braku korelacji pomiędzy badanymi cechami. Siłę korelacji pomiędzy badanymi cechami można oszacować za pomocą współczynnika determinacji, który jest kwadratem współczynnika Pearsona:

$$r^2_{xy} = \left(\frac{\text{cov}(x, y)}{s(x)s(y)} \right)^2 \quad (3)$$

Wartość tego współczynnika wyrażona w procentach informuje, w jakim stopniu zmiany zmiennej niezależnej miały wpływ na zmiany zmiennej zależnej [Sobczyk]. Przykładowo dla $r^2_{xy} = 0,16$ oznacza, że tylko 16% zmian zmiennej niezależnej miało wpływ na zmiany zmiennej zależnej. Wstępny ogląd rozkładu przedstawionego na Rys. 4 i Rys. 5 upoważnia do stwierdzenia, że między badanymi cechami zachodzi korelacja liniowa o następującej postaci:

$$\hat{y}_i = a_0 + a_1 x_i + u_i \quad (4)$$

Gdzie \hat{y}_i jest funkcją regresji y względem x w próbie losowej zwaną aproksymantą, a_0 i a_1 to parametry strukturalne tej funkcji natomiast $u_i = y_i - \hat{y}_i$ jest składnikiem resztowym funkcji. Do oszacowania parametrów strukturalnych funkcji (4) można zastosować metodę najmniejszych kwadratów, co oznacza że poszukiwano takich wartości parametrów przy których wyrażenie [4]:

$$W = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \quad (5)$$

osiąga minimum. W takim przypadku zagadnienie sprowadza się do znalezienia minimum funkcji kwadratowej dwóch zmiennych. Warunkiem koniecznym istnienia ekstremum jest zerowanie się pochodnych cząstkowych, które dla wyrażenia (5) ze względu na a_0 i a_1 są następujące:

$$\frac{\partial W}{\partial a_0} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) (-1) \quad (6)$$

$$\frac{\partial W}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i) (-x_i) \quad (7)$$

This coefficient is a normalized measure taking values from the range $-1 \leq r_{xy} \leq 1$. If its value is greater than 0.5, then there is a clear correlation between the studied features [4]. This interpretation also applies to negative values of the coefficient. If $r_{xy} = |1|$ the correlative relationship changes into a functional relationship; if $r_{xy} = 0$ there is a complete lack of correlation between the studied features. The strength of the correlation between the studied features can be estimated using the coefficient of determination, which is the square of Pearson's coefficient:

$$r^2_{xy} = \left(\frac{\text{cov}(x, y)}{s(x)s(y)} \right)^2 \quad (3)$$

The value of this coefficient expressed as a percentage indicates the extent to which the changes in the independent variable affected the dependent variable changes [Sobczyk]. For example, $r^2_{xy} = 0,16$ means that only 16% of the change of the independent variable affected the dependent variable changes. A preliminary overview of the distribution shown in Figure 4 and Figure 5 allows us to state that between the studied features there is a linear correlation with the following form:

$$\hat{y}_i = a_0 + a_1x_i + u_i \quad (4)$$

Where \hat{y}_i is the regression function of y to x in a random sample called approximant, a_0 and a_1 are the structural parameters of this function, and $u_i = y_i - \hat{y}_i$ is a residual component of the function. To estimate the structural parameters of the function (4), we can use the method of least squares, which means that such values of the parameters were sought, where the expression [4]:

$$W = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i)^2 \quad (5)$$

reaches a minimum. In this case, the problem boils down to finding the minimum of quadratic functions of two variables. The state of partial derivatives equaling zero is a prerequisite of the existence of the extrema, which for the expression (5), because of a_0 and a_1 , are as follows:

$$\frac{\partial W}{\partial a_0} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i)(-1) \quad (6)$$

$$\frac{\partial W}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i)(-x_i) \quad (7)$$

Po odpowiednich przekształceniach uzyskuje się układ równań o następującej postaci:

$$\sum_{i=1}^n y_i = na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i = a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (9)$$

który można rozwiązać metodą wyznaczników:

$$W \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix} \quad W_{a_1} \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix} \quad W_{a_0} \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i x_i \end{vmatrix} \quad (10)$$

Skąd otrzymujemy:

$$W = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2$$

$$W_{a_1} = \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i x_i \quad (9)$$

$$W_{a_0} = n \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i$$

Z powyższych równań można wyprowadzić zależności na parametry strukturalne funkcji \hat{y}_i :

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (10)$$

$$a_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (11)$$

Ocenę stopnia zgodności wyznaczonej funkcji regresji (dobroci dopasowania) wykonano na drodze badania zgodności aproksymanty z wynikami empirycznymi.

After the appropriate transformation, a system of equations in the following form is obtained:

$$\sum_{i=1}^n y_i = na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i = a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (9)$$

which can be solved by determinants:

$$W \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix} \quad W_{a_1} \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix} \quad W_{a_0} \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i x_i \end{vmatrix} \quad (10)$$

From where we get:

$$W = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2$$

$$W_{a_1} = \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i x_i \quad (9)$$

$$W_{a_0} = n \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i$$

From the above equations, we can derive dependencies on the structural parameters of the function \hat{y}_i :

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (10)$$

$$a_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (11)$$

The assessment of the degree of conformity of the designated regression function (goodness-of-fit index) was performed by examining the compliance of the approximant with the empirical results.

Badania te prowadzono wyznaczając odchylenie standardowe składnika resztowego oraz określając współczynnik zmienności losowej składnika. Ponadto wykonano badanie składnika resztowego w kierunku oceny jego normalności, symetryczności oraz analizy rozrzutu. Aby uwzględnić wpływ zmiennych nieuwzględnionych w równaniu regresji na zmienną objaśnianą wykonano badania autokorelacji reszt (interakcji).

Odchylenie standardowe składnika resztowego (średni błąd dopasowania) określano z zależności:

$$S_{\xi} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{n - w} \quad (12)$$

gdzie:

- S_{ξ} - średni błąd dopasowania,
- i - numer obserwacji,
- n - liczba obserwacji,
- y_i - empiryczne wartości zmiennej Y ,
- \hat{y}_i - teoretyczne wartości zmiennej Y ,
- W - liczba parametrów strukturalnych badanej funkcji regresji (tu $w = 2$).

Wartość S_{ξ} informuje o ile średnio różnią się rzeczywiste wartości zmiennej objaśnianej (Y) od wartości teoretycznych wyznaczonych za pomocą opracowanego modelu. Dopasowanie modelu do danych empirycznych jest tym lepsze nim mniejsza jest wartość odchylenia standardowego składnika resztowego. Ponieważ jednak wielkość ta jest miarą mianowaną wyrażoną w tych samych jednostkach, co zmienna Y nie daje ona pełnej informacji o dobroci dopasowania modelu. Stąd też należy również zastosować ocenę dopasowania w relacji do przeciętnego poziomu modelowanego zjawiska, czyli w odniesieniu wielkości średniego błędu dopasowania do średniego poziomu zmiennej objaśnianej. W tym celu stosuje się współczynnik zmienności losowej:

$$V_{\xi} = \frac{S_{\xi}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (13)$$

gdzie:

- V_{ξ} - Współczynnik zmienności losowej [%],
- S_{ξ} - średni błąd dopasowania,
- \bar{y} - średnia arytmetyczna wielkości Y z próby.

Wartość V_{ξ} informuje o ile średnio w procentach mylimy się obliczając wartość zmiennej Y za pomocą opracowanego modelu. Ocenę normalności rozkładu składnika resztowego realizowano na drodze oglądu histogramu reszt a formalną hipotezę o normalności składnika weryfikowano testem Shapiro – Wilka:

These studies were carried out by setting the residual standard deviation and the component's random variable coefficient. In addition, the residual test was performed to assess its normality, symmetry, and the analysis of scatterplot. To consider the influence of variables not included in the regression on the response variable, residual autocorrelation test was performed.

The residual standard deviation (average fitting error) was determined from the relation:

$$S_{\xi} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{n - w} \quad (12)$$

where:

- S_{ξ} - average fitting error,
- i - observation's number,
- n - number of observations,,
- y_i - empirical values of variable Y,
- \hat{y}_i - theoretical values of variable Y,
- w - number of structural parameters of studied regression function (here $w = 2$).

The value S_{ξ} indicates how much different are the actual values of the response variable (Y) from the theoretical value set by the model. The lower the value of the residual standard deviation, the better the fitting of the model to the empirical data. However, since this figure is a measure expressed in the same units as the variable Y, it does not give complete information about the goodness of fit of the model. Hence, we should also apply matching assessment in respect to the average level of modeled phenomena, that is the relation between the size of the average error of fit to the average level of response variable. For this purpose, the random variation coefficient is used:

$$V_{\xi} = \frac{S_{\xi}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (13)$$

where:

- V_{ξ} - random variable coefficient [%],
- S_{ξ} - average fitting error,
- \bar{y} - arithmetic mean of value Y from the test.

The value V_{ξ} indicates in percentage how much, on average, we are wrong in calculating the value of the variable Y using the developed model. The assessment of the residual distribution normality was carried out by watching the histogram of residuals, and the formal hypothesis of its normality was verified by a Shapiro – Wilk test:

$$W = \frac{\left[\sum_{i=1}^{\lfloor n/2 \rfloor} a_{n,i} (e_{n-i+1} - e^{(i)}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2} \quad (14)$$

gdzie:

- W - statystyka Shapiro – Wilka,
- $a_{n,i}$ - stabilizowane współczynniki testu SW odczytane dla liczebności próby n ,
- $n/2$ - część całkowita liczby $n/2$,
- e_i - nieuporządkowane wartości reszt,
- $e^{(i)}$ - wartości reszt uporządkowane rosnąco,
- \bar{e} - średnia arytmetyczna z reszt,
- n - liczebność próby.

Za pomocą powyższego testu weryfikowano następujące hipotezy:

$$H_0 : F(e) \in F_N \quad (15)$$

$$H_1 : F(e) \notin F_N \quad (16)$$

gdzie F_N jest rodziną dystrybuant normalnych. W tym przypadku analizie podlega zbiór krytyczny: $K = \langle 0; k \rangle$ gdzie wartość liczby k odczytujemy dla poziomu istotności α i danego n z tablicy testu Shapiro – Wilka, a reguły decyzyjne są następujące:

$$W \in K \text{ to odrzucamy } H_0 \quad (17)$$

$$W \notin K \text{ to nie ma podstaw do odrzucenia } H_0 \quad (18)$$

Natomiast badanie symetrii składnika losowego przeprowadzono w oparciu o statystykę:

$$U = \frac{\frac{m}{n} - 1}{\sqrt{\frac{\frac{m}{n} \left(1 - \frac{m}{n}\right)}{n-1}}} \quad (19)$$

gdzie:

- m - liczba reszt dodatnich,
- n - liczba obserwacji.

Weryfikacji podlegają następujące hipotezy:

$$H_0 : \left(\frac{m}{n} = \frac{1}{2} \right) \quad (20)$$

$$W = \frac{\left[\sum_{i=1}^{\lfloor n/2 \rfloor} a_{n,i} (e_{n-i+1} - e(i)) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2} \quad (14)$$

where:

- W - Shapiro – Wilk statistic,
- $a_{n,i}$ - SW test coefficients, read for sample size n ,
- $n/2$ - integer part of $n/2$,
- e_i - disordered residues,
- $e(i)$ - residual values sorted in ascending order,
- \bar{e} - arithmetic mean of the residuals,
- n - sample size.

The following hypotheses were verified using this test:

$$H_0 : F(e) \in F_N \quad (15)$$

$$H_1 : F(e) \notin F_N \quad (16)$$

where F_N is a family of normal distributions. In this case, the critical set $K = \langle 0; k \rangle$ is subject of analysis, where the value of k is read for the level of significance α and a given n from the Shapiro - Wilk test table, and the decision rules are as follows:

$$W \in K \text{ we reject } H_0 \quad (17)$$

$$W \notin K \text{ there is no reason to reject } H_0 \quad (18)$$

The study of the symmetry of the random component was based on statistics:

$$U = \frac{\frac{m}{n} - 1}{\sqrt{\frac{\frac{m}{n} \left(1 - \frac{m}{n} \right)}{n-1}}} \quad (19)$$

where:

- m - number of positive residuals,
- n - number of observations.

The following hypotheses are subject to verification:

$$H_0 : \left(\frac{m}{n} = \frac{1}{2} \right) \quad (20)$$

$$H_1 : \left(\frac{m}{n} \neq \frac{1}{2} \right) \quad (21)$$

Rozpatrywany jest zbiór krytyczny: $K = (-\infty; -k) \cup (k; +\infty)$ gdzie wartość liczby k jest odczytywana dla poziomu istotności α z rozkładu Studenta, a reguły decyzyjne są następujące:

$$U \in K \text{ to odrzucamy } H_0 \quad (22)$$

$$U \notin K \text{ to nie ma podstaw do odrzucenia } H_0 \quad (23)$$

Analizę rozrzutu reszt wykonano metodą graficzną wykonując wykres rozrzutu, gdzie pierwsza współrzędna jest równa badanej zmiennej objaśniającej a druga to reszta wyliczona dla tego obiektu. Sprawdzono również korelację analitycznie wykorzystując równanie (2). Określenia wpływu zmiennych nieuwzględnionych w równaniu regresji dokonano za pomocą testu Dubrina – Watsona:

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (24)$$

Testowane są następujące hipotezy:

$$H_0 : \text{brak autokorelacji} \quad (25)$$

$$H_1 : \text{występuje autokorelacja pierwszego rzędu} \quad (26)$$

W tym przypadku sposób testowania zależy od tego czy sprawdzana jest obecność dodatniej czy ujemnej autokorelacji. Tablice rozkładu DW zawierają wartości krytyczne w zależności od liczby zmiennych w modelu i ilości obserwacji. Dla każdej takiej pary liczb dane są dwie wartości krytyczne: d_L i d_U a reguły decyzyjne są następujące:

1. Jeżeli zakładamy istnienie autokorelacji dodatniej to $DW < 2$ oraz

- a.) $DW < d_L$ to odrzucamy hipotezę zerową o braku autokorelacji i przyjmujemy, że w modelu jest dodatnia autokorelacja,
- b.) $d_L < DW < d_U$ to brak autokorelacji,
- c.) $DW > d_U$ to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 o braku autokorelacji.

2. Jeżeli zakładamy istnienie autokorelacji ujemne to $DW > 2$ oraz

- a.) $DW > 4 - d_L$ to odrzucamy hipotezę zerową H_0 o braku autokorelacji i przyjmujemy, że w modelu jest ujemna autokorelacja,
- b.) $4 - d_U < DW < 4 - d_L$ to brak autokorelacji,
- c.) $DW < 4 - d_U$ to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 .

3. Jeśli $DW = 2$ to brak jest autokorelacji.

$$H_1 : \left(\frac{m}{n} \neq \frac{1}{2} \right) \quad (21)$$

Critical set $K = (-\infty; -k) \cup (k; +\infty)$ is studied here, where the value of k is read for the level of significance α from Student's distribution, and decision rules are as follows:

$$U \in K \text{ we reject } H_0 \quad (22)$$

$$U \notin K \text{ there is no reason to reject } H_0 \quad (23)$$

The analysis of residuals scatterplot was done graphically, creating a scattergraph, where the first coordinate was equal to the explanatory variable and the second was a residual calculated for the object. It also analytically examined the correlation using equation (2). Determining the effect of variables not included in the regression equation was made using the Durbin - Watson test:

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (24)$$

The following hypotheses are tested:

$$H_0 : \text{no autocorrelation} \quad (25)$$

$$H_1 : \text{there is first-order autocorrelation} \quad (26)$$

In this case, the testing method depends on whether we check the presence of positive or negative autocorrelation. DW distribution tables contain critical values depending on the number of variables in the model and number of observations. For each such pair of numbers, there are two critical values: d_L and d_U , and the decision rules are as follows:

1. If we assume the existence of positive autocorrelation, then is $DW < 2$ and:

- a.) $DW < d_L$ we reject the null hypothesis of no autocorrelation and assume that in the model there is positive autocorrelation,
- b.) $d_L < DW < d_U$ there is lack of autocorrelation,
- c.) $DW > d_U$ there is no reason to reject the H_0 hypothesis of no autocorrelation

2. If we assume the existence of negative autocorrelation, then $DW > 2$ and:

- a.) $DW > 4 - d_L$ reject the null hypothesis H_0 of no autocorrelation and assume that in the model there is negative autocorrelation,
- b.) $4 - d_U < DW < 4 - d_L$ means lack of autocorrelation,
- c.) $DW < 4 - d_U$ there is no reason to reject the H_0 .

3. If $DW = 2$, there is lack of autocorrelation.

3.DYSKUSJA WYNIKÓW

Korzystając z zależności (2) i (3) obliczono współczynniki r_{xy} i r_{xy}^2 dla empirycznych rozkładów $T = f(N)$, które odpowiednio wyniosły:

- dla pędnika pionowego: $r_{xy} = 0,99$; $r_{xy}^2 = 0,97$,
- dla pędnika poziomego: $r_{xy} = 0,98$; $r_{xy}^2 = 0,97$.

Oznacza to, że pomiędzy cechami zachodzi silna i dodatnia korelacja liniowa i potwierdza przypuszczenia odnośnie wyboru klasy poszukiwanej funkcji regresji w postaci funkcji liniowej (4). Wartość współczynnika determinacji w obydwu przypadkach jest taka sama i oznacza, że 97% zmian zmiennej objaśniającej (moc dostarczona do układu napędowego) miało wpływ na zmiany zmiennej objaśnianej (siła naporu).

Korzystając z zależności: (5), (6), (7), (8) i (9) wyznaczono parametry strukturalne funkcji (4), która odpowiednio przedstawia się w następujący sposób:

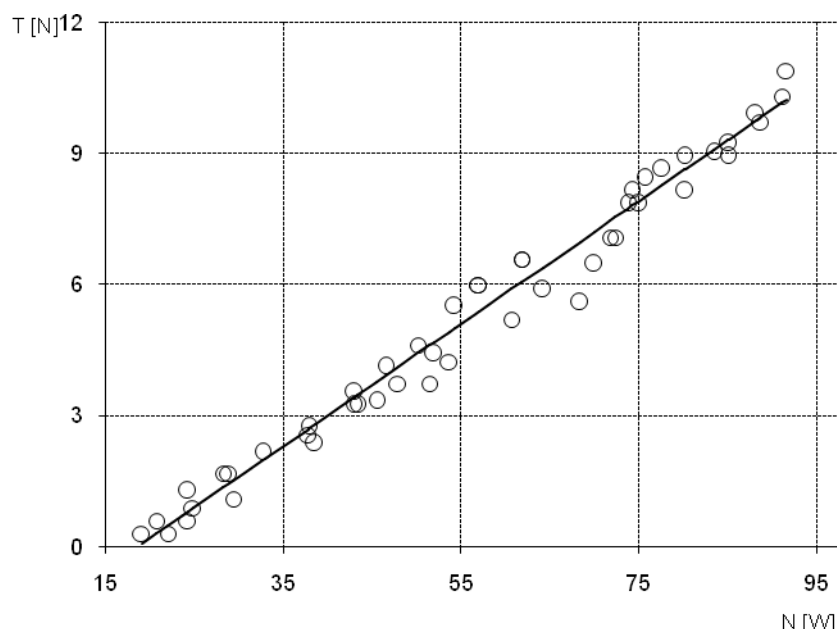
- dla pędnika pionowego:

$$\hat{y}_i = -2,6 + 0,14x_i \quad (10)$$

- dla pędnika poziomego:

$$\hat{y}_i = -3,8 + 0,17x_i \quad (11)$$

Na rysunku poniżej przedstawiono empiryczny rozkład siły naporu w funkcji mocy dostarczonej do układu napędowego oraz jego aproksymantę wykreśloną na podstawie równania (10) dla prób pędnika pionowym.



Rys. 6. Empiryczny rozkład $T = f(N)$ i jego aproksymanta dla prób pędnika pionowego realizowanych na głębokości 2 metrów w basenie nurkowym.

3. DISCUSSION OF RESULTS

Using the formula (2) and (3), the coefficients r_{xy} and r_{xy}^2 for empirical distributions $T = f(N)$ were calculated, which were respectively:

- for the vertical thruster: $r_{xy} = 0,99$; $r_{xy}^2 = 0,97$,
- for the horizontal thruster: $r_{xy} = 0,98$; $r_{xy}^2 = 0,97$.

This means that between the features, there is a strong and positive linear correlation, and it also confirms the supposition about the choice of class of the regression function as a linear function (4). The value of the coefficient of determination in both cases is the same, and means that 97% of the explanatory variable changes (power delivered to the propulsion system) had an impact on changes in response variable (thrust force).

Using the formulas: (5), (6), (7), (8) and (9), structural parameters of the function (4) were determined, which looks as follows:

- for the vertical thruster:

$$\hat{y}_i = -2,6 + 0,14x_i \quad (10)$$

- for the horizontal thruster:

$$\hat{y}_i = -3,8 + 0,17x_i \quad (11)$$

The figure below shows the empirical distribution of thrust force as a function of power supplied to the drive system and its approximant drawn on the basis of equation (10) for tests performed on the vertical thruster.

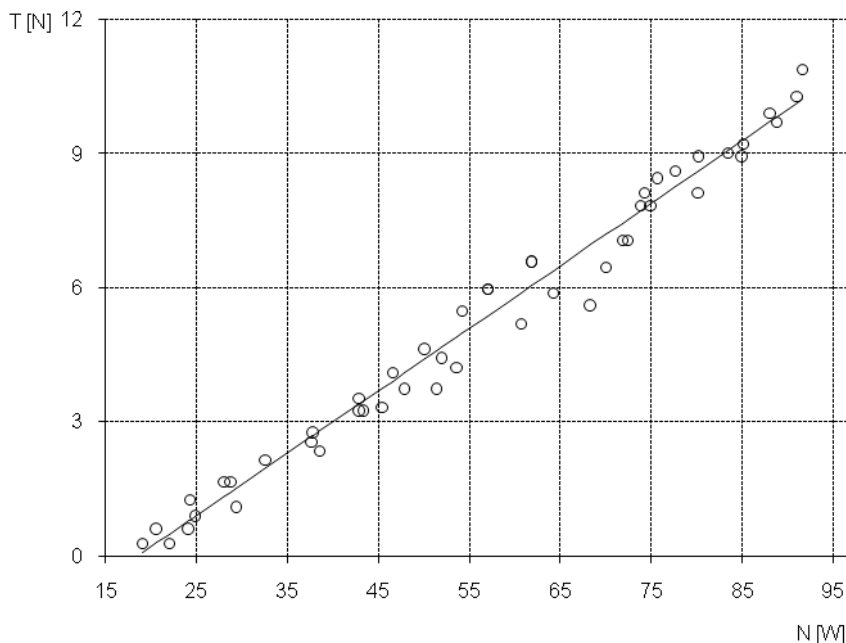
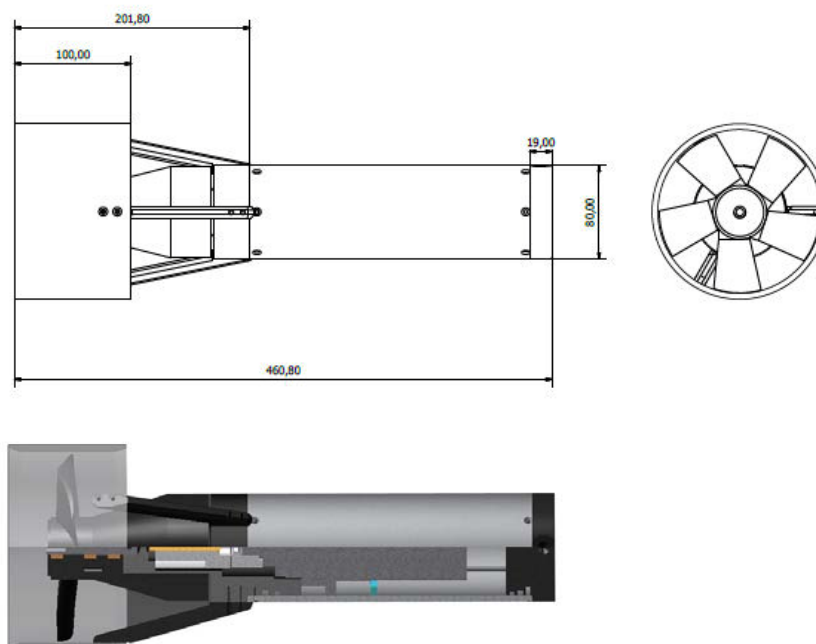


Fig. 6 Empirical distribution $T = f(N)$ and its approximant for vertical thruster tests carried out at the depth of 2 meters in a diving pool.

4. WNIOSKI

Na podstawie eksperymentu stwierdzono, że wzrost mocy dostarczonej do układu napędowego przekłada się wprost na wzrost siły naporu obu badanych pędników. W jednym i w drugim przypadku 97% zmian mocy miało wpływ na zmiany siły naporu. W warunkach prób zmiany te miały charakter liniowy. Oznacza to, że zaprojektowany i zbudowany układ napędowy pojazdu mini ROV „Gammarus” przenoszący napęd za pomocą sprzęgła magnetycznego spełnia przewidzianą dla niego funkcję celu. Umożliwia ruch pojazdu w płaszczyźnie pionowej i poziomej oraz na drodze separacji śrub i silnika za pomocą sprzęgła magnetycznego chroni ten niewrażliwy element konstrukcyjny przed zalaniem.

Wyniki badań realizowanych z wykorzystaniem prototypu pojazdu mini ROV „Gammarus” potwierdzające słuszność zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych zostały wykorzystane i zaimplementowane podczas budowy i projektowania napędu dla innego pojazdu. Pojazd został zbudowany w Przedsiębiorstwie Badawczo – Produkcyjnym „Forkos” Sp. z o.o. z Gdyni. Jest to małogabarytowy pojazd typu ROV o masie w powietrzu nie przekraczającej 50 kg (miniROV) (Rys. 8), którego układ napędowy składa się z trzech pędników, dwóch poziomych i jednego pionowego wyposażonych w opisany w niniejszym materiale układ przeniesienia napędu, nieznacznie zmodyfikowany w zakresie rozkładu sił magnetycznych (Rys. 7).



Rys. 7. Zespół napędowy pojazdu miniROV KH-100.

4. CONCLUSIONS

On the basis of the experiment, it was found that an increase in power supplied to the drive system directly causes an increase in thrust force in the two studied thrusters. In both cases, 97% of the power change had an impact on changes in thrust force. In a trial, these changes were linear. This means that the drive system which was designed and built for the miniROV *Gammarus*, transmitting the drive via magnetic coupling, meets its objective function. The drive system allows the vehicle to move in vertical and horizontal plane; it also minimises, by their physical separation from the moving portion of the system, the potential for water ingress to damage sensitive elements of the design (motor and bolts).

The results of the tests carried out using the prototype miniROV *Gammarus*, having confirmed the validity of the design solutions, have since been used and implemented during the construction and design of a drive for another vehicle. This second vehicle was built by the Manufacturing and Research Company *Forkos Ltd* (Przedsiębiorstwo Badawczo – Produkcyjne „Forkos” Sp. z o.o.) in Gdynia. It is a small ROV with a mass in the air not exceeding 50 kg (miniROV) (Fig. 8), whose drive system consists of three thrusters, two horizontal and one vertical, with the power transmission system described in this article, slightly modified in the field of magnetic force distribution (Figure . 7).

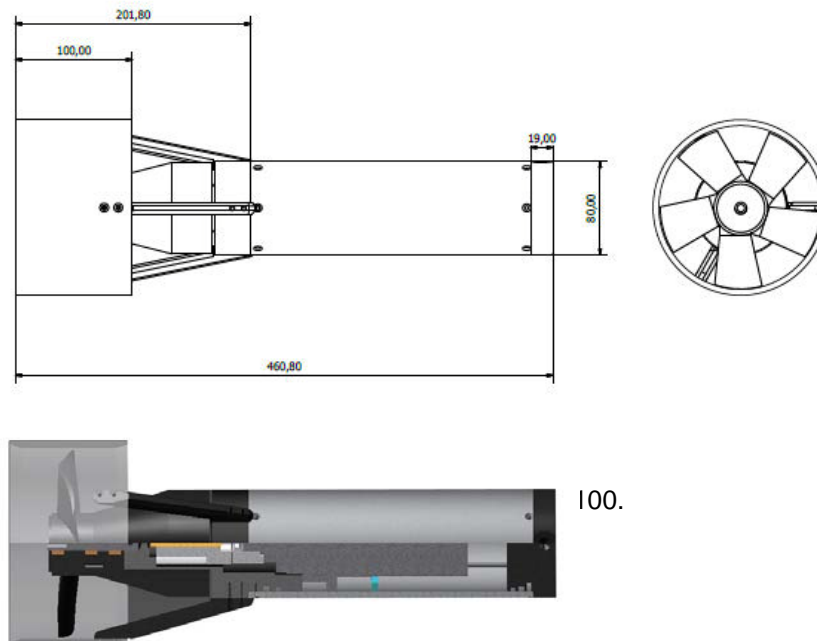
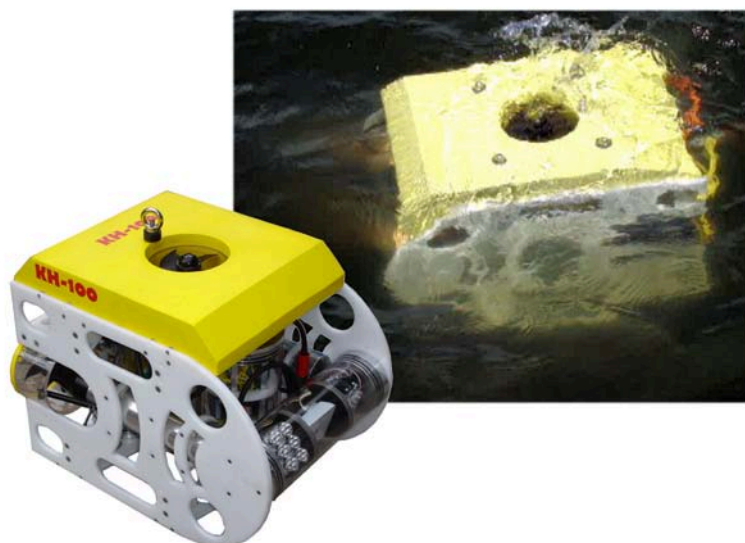


Fig. 7. Drive system of miniROV KH-100.



Rys. 8. Pojazd miniROV KH-100 zbudowany przez PBP „Forkos” Sp. z o.o. w Gdyni.

Aktualnie PBP „Forkos” wraz z Zakładem Technologii Prac Podwodnych AMW jako konsorcjum naukowo-przemysłowe bierze udział w konkursie na finansowanie projektu w ramach programu Innotech organizowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, którego celem ma być przygotowanie do wdrożenia i komercjalizacja pojazdu KH-100.

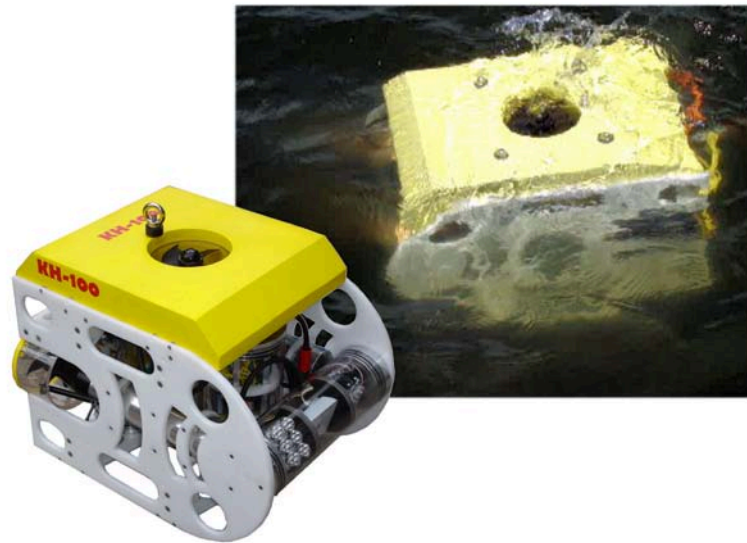


Fig. 8. MiniROV KH-100 built by *Forkos Ltd* in Gdynia.

Currently, *Forkos Ltd* together with the Department of Underwater Work Technology at the Naval Academy in Gdynia, working as a scientific and industrial consortium, is taking part in a competition for project funding in the Innotech program organized by the National Center for Research and Development, whose goal is to prepare for the implementation and commercialization of the vehicle KH-100.

LITERATURA / BIBLIOGRAPHY

1. Chrabąszcz P.: „Badania modelowe prototypu zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego” Praca dyplomowa magisterska pod kierunkiem A.Olejnik AMW Gdynia 2007 rok,
2. Dobosz M.: „Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań” Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001 rok, ISBN 83-87674-29-X,
3. Olejnik A., Chrabąszcz P.: „Wstępne badania modelu demonstracyjnego pojazdu ROV” Polish Hyperbaric Research Nr 3(16)2006 rok, ISSN 1734-7009, str. 17 – 25,
4. Sobczyk M.: „Statystyka” Wyd. Naukowe PWN Warszawa 2007 rok, ISBN 978-83-01-15199-7.