



**AKADEMIA MARYNARKI WOJENNEJ**  
**im. Bohaterów Westerplatte**  
**WYDZIAŁ MECHANICZNO-ELEKTRYCZNY**  
**Instytut Budowy i Eksploatacji Okrętów**



kmdr por. dr inż. Artur Bogdanowicz  
kmdr ppor. mgr inż. Paweł Socik

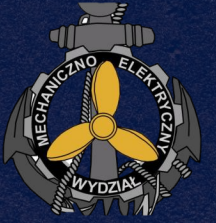
**Analiza symulowanych obciążeń dynamicznych  
okrętowego układu napędowego  
o niekonwencjonalnym układzie zasilania**



# AGENDA



- 1. Zagadnienie badawcze**
- 2. Okręt jako obiekt badań**
- 3. Warunki obciążeń (ustalone i dynamiczne)**
- 4. Badania empiryczne na stanowisku badawczym**
- 5. Wyniki badań**
- 6. Wnioski**



# Zagadnienie badawcze



HySeas III (Fot. Kongsberg)



Kontenerowiec napędzany paliwem wodorowym (Fot: <https://wodorowyswiat.pl>)



Energy Observer 2 - prototyp statku towarowego zasilanego ciekłym wodorem (Fot: JB Epron Design / Kadeg Boucher )



RAS (Źródło <https://kopalniawiedzy.pl>)



# Zagadnienie badawcze

NEWS | June 8, 2016

## NRL Seawater Carbon Capture Process Receives U.S. Patent

By Daniel Parry

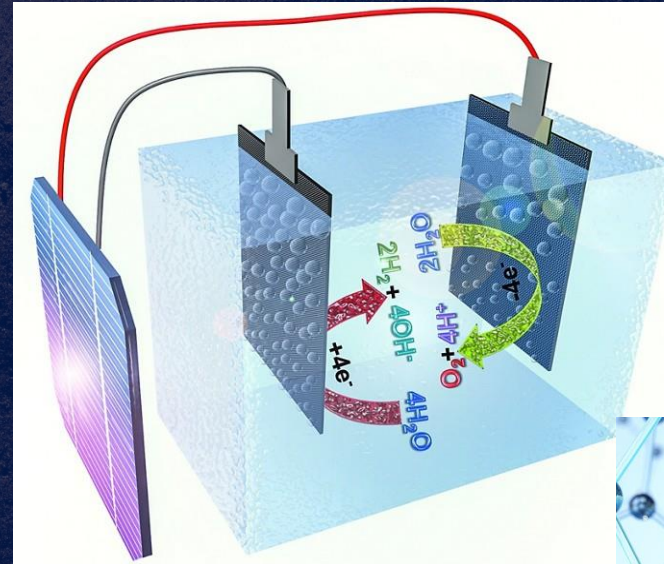
The U.S. Naval Research Laboratory (NRL), Material Science and Technology Division, has been granted the first U.S. patent for a method to simultaneously extract carbon dioxide and hydrogen from seawater. This single process provides all the raw materials necessary for the production of synthetic liquid hydrocarbon fuels.

Issued April 5, 2016, by the United States Patent and Trademark Office (USPTO), patent #9303323 names co-contributors and inventors: Cmdr. Felice DiMascio, U.S. Naval Reserve; Dennis Hardy, NRL; M. Kathleen Lewis, Office of Naval Research (ONR); Heather Willauer, NRL; and Frederick Williams, NRL.

Synthetic fuel production can offer significant logistical and operational advantages to the Navy by reducing dependency on future in-theater fossil fuel availability and by reducing the vulnerabilities resulting from unprotected fuel delivery at sea. The Electrolytic Cation Exchange Module (E-CEM), developed at NRL, provides the Navy the capability to produce fuel stock (LNG, CNG, F-76, JP-5, etc.) at sea, or in remote locations.

"A ship's ability to produce a significant fraction of the battle group's fuel for operations at sea could reduce the mean time between refueling, and increase the operational flexibility and time on station," said Cmdr. DiMascio. "Reducing the logistics tail on fuel delivery with the potential to increase the Navy's energy security and independence, with minimal impact on the environment, were key factors in the development of this program."

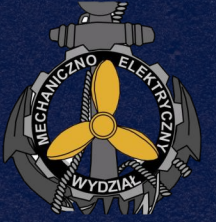
Patent US Navy „metody jednoczesnej ekstrakcji dwutlenku węgla i wodoru z wody morskiej” (Źródło: <https://www.nrl.navy.mil>)



Elektroliza wody morskiej zasilana energią słoneczną (Źródło: <https://cen.acs.org>)



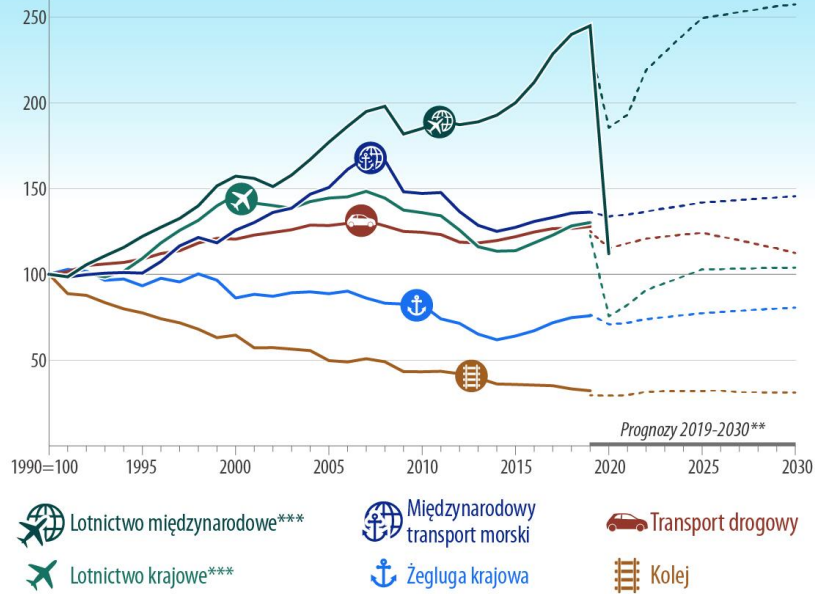
Wodór jako źródło energii (Źródło: <https://arstechnica.com>, Fot. Andriy Onufriyenko)



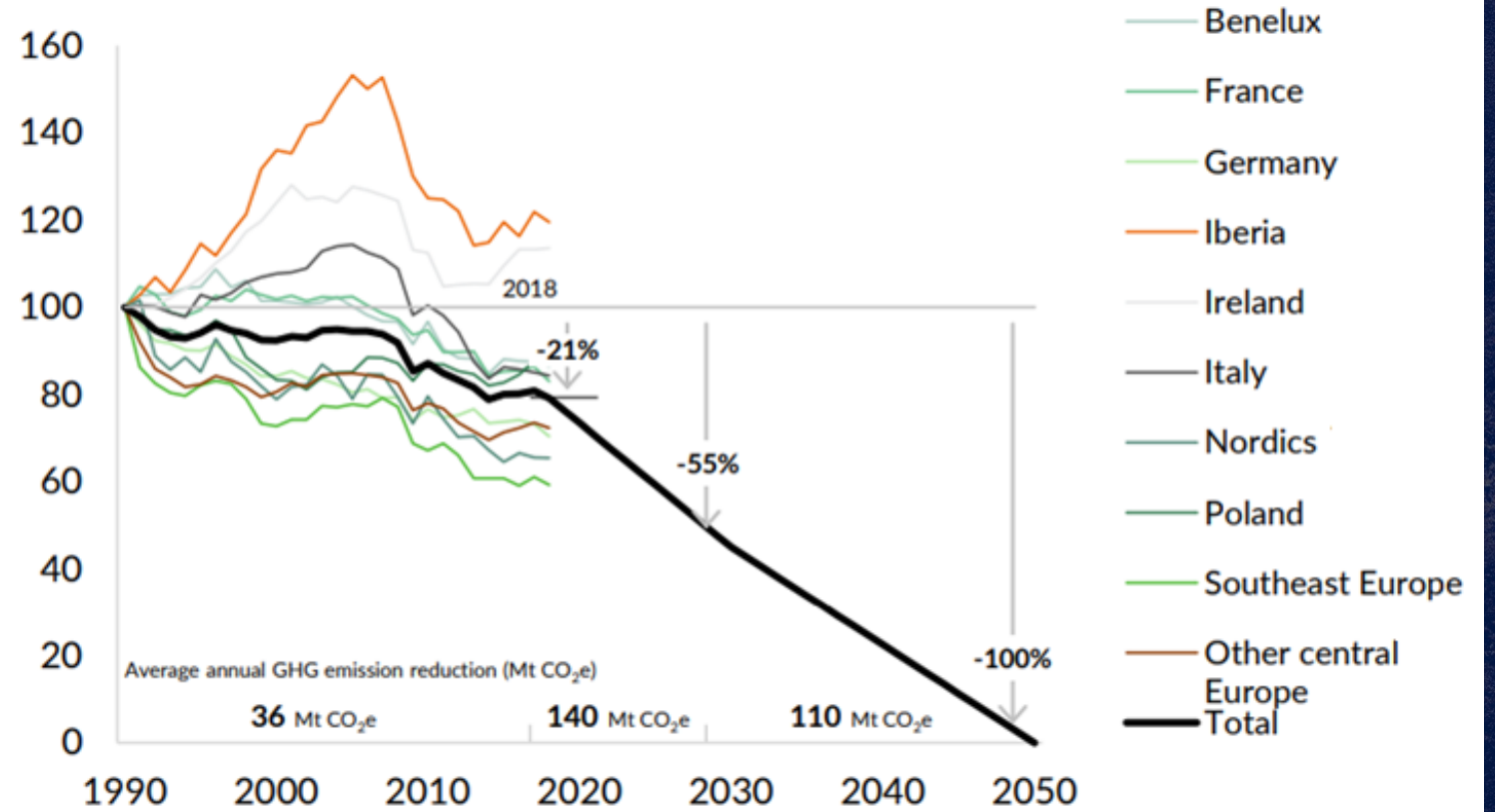
# Zagadnienie badawcze

## Emisja gazów cieplarnianych z transportu w UE\*

Zmiany w poziomie emisji od 1990 r.

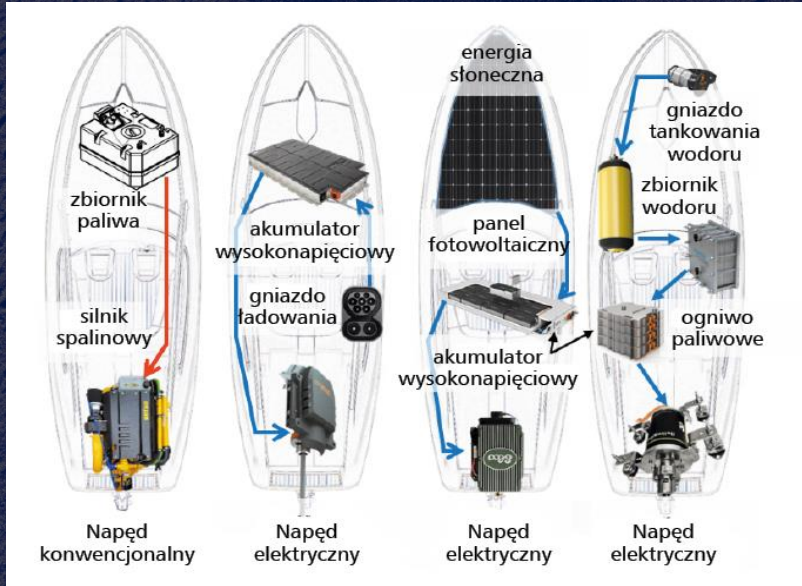


Emisja gazów cieplarnianych z transportu w UE  
(Źródło: Europejska Agencja Środowiska (2022))

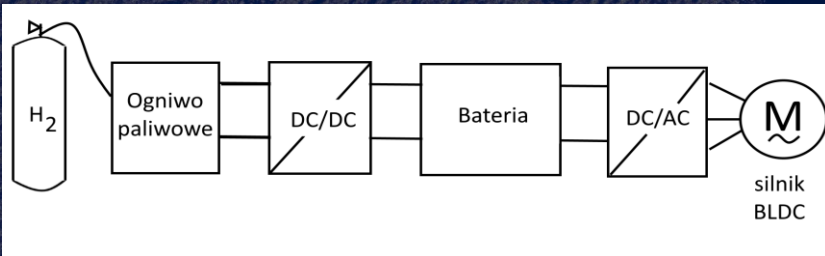


Plany redukcji emisji dwutlenku węgla do roku 2050 dla państw UE  
(Źródło: <https://s27.q4cdn.com>)

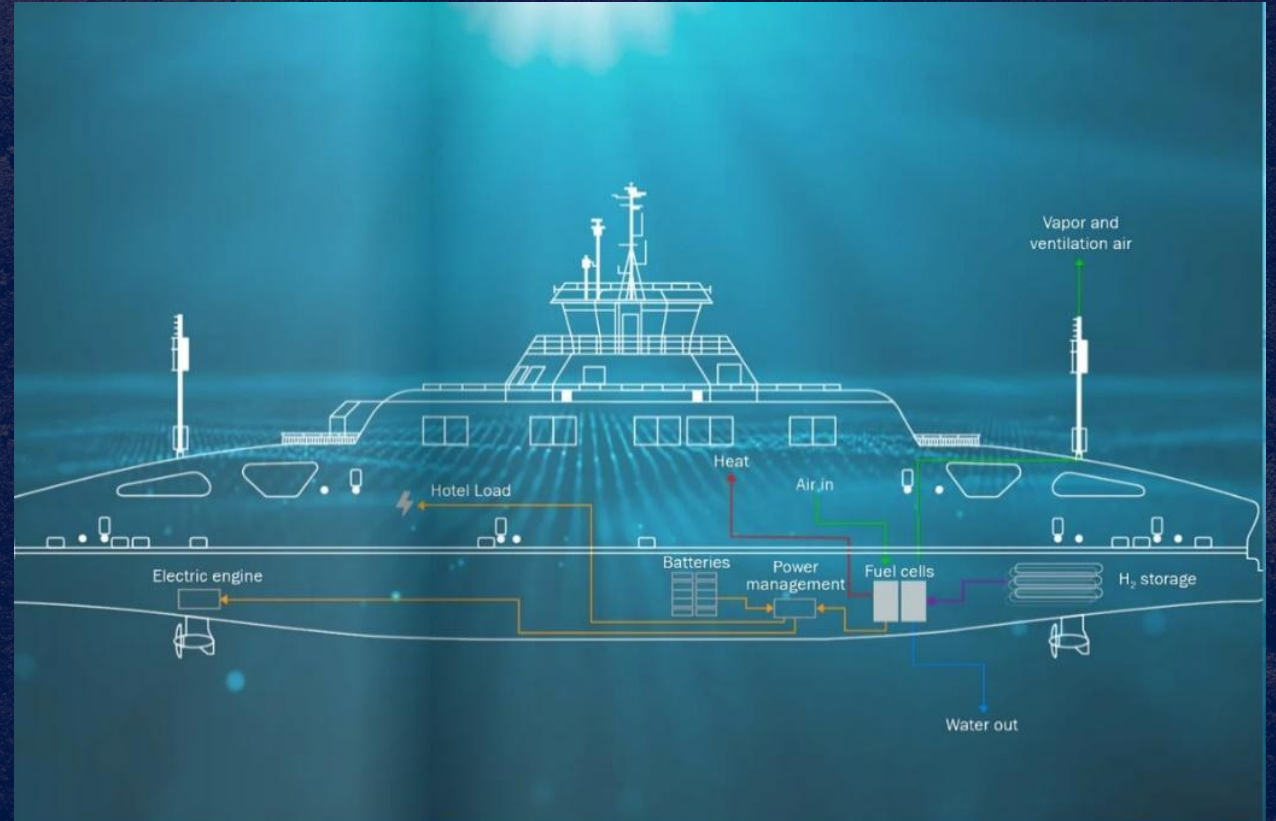
# Zagadnienie badawcze



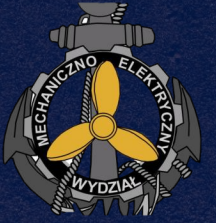
Uproszczona systematyka napędów jednostek pływających (Źródło: <https://btj.com.pl>)



Schemat jednostki napędowej w którym bateria może być doładowywana z ogniwa paliwowego (Źródło: Sprawozdanie Niekonwencjonalne źródła (...) w aspekcie poprawienia ich zdolności operacyjnych)



200-kilowatowy system FCwave™ firmy translatorBallard - pierwszy na świecie moduł do zastosowań morskich (Źródło: <https://www.sustainable-ships.org>)



# Okręt jako obiekt badań



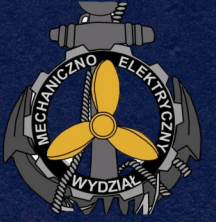
ORP Drużno (Źródło: <https://polska-zbrojna.pl>)

## Dane charakterystyczne trawłowca ORP Drużno

Wielkości charakterystyczne	Wartości	
	standardowa	pełna
Wyporność [t]	191	216
Zanurzenie średnie [m]	1,60	1,68
Długość całkowita [m]	38,48	
Długość między pionami [m]	36,49	
Szerokość całkowita [m]	7,34	
Rok budowy	1990	
Miejsce budowy	Stocznia Marynarki Wojennej	



ORP Drużno (Źródło: <https://polska-zbrojna.pl>)



# Okręt jako obiekt badań



Widok silnika MTU 8V2000 M72 (Źródło: <https://www.mtu-solutions.com>)

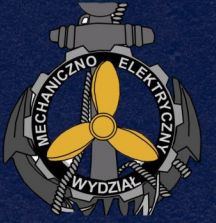
Dane techniczne silnika 8V2000 M72 (Źródło: <https://www.mtu-solutions.com>)

Znamionowa prędkość obrotowa	obr/min	2 250
Moc znamionowa silnika	kW	720
Liczba cylindrów		8
Konfiguracja cylindrów: kąt V	°	90
Skok tłoka	mm	156
Średnica cylindra	mm	135
Pojemność skokowa cylindra	litr	2,23
Całkowita pojemność skokowa silnika	litr	17,84
Liczba zaworów wlotowych na cylinder		2
Liczba zaworów wylotowych na cylinder		2





# Warunki obciążeń (ustalone i dynamiczne)



Procesy obciążenia silnika w czasie jego eksploatacji można traktować jako proces stochastyczny (przy czym postój silnika traktowany jest jako dodatkowy stan eksploatacyjny) opisany przestrzenią stanów procesu:

$$\Omega = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$$

gdzie:

$e_1$  – stan pracy silnika na „biegu luzem”,  $n = 600$  obr/min,

$e_2$  – stan pracy silnika na „bardzo wolno naprzód”,  $n = 600$  obr/min,  $P_e = 0,03 P_z$  (20 kW),

$e_3$  – stan pracy silnika na „wolno naprzód”,  $n = 1\ 200$  obr/min,  $P_e = 0,15 P_z$  (110 kW),

$e_4$  – stan pracy silnika na „pół naprzód”,  $n = 1\ 800$  obr/min,  $P_e = 0,51 P_z$  (370 kW),

$e_5$  – stan pracy silnika na „cała naprzód”,  $n = 2\ 250$  obr/min,  $P_e = P_z$  (720 kW),

$e_6$  – „stop”.



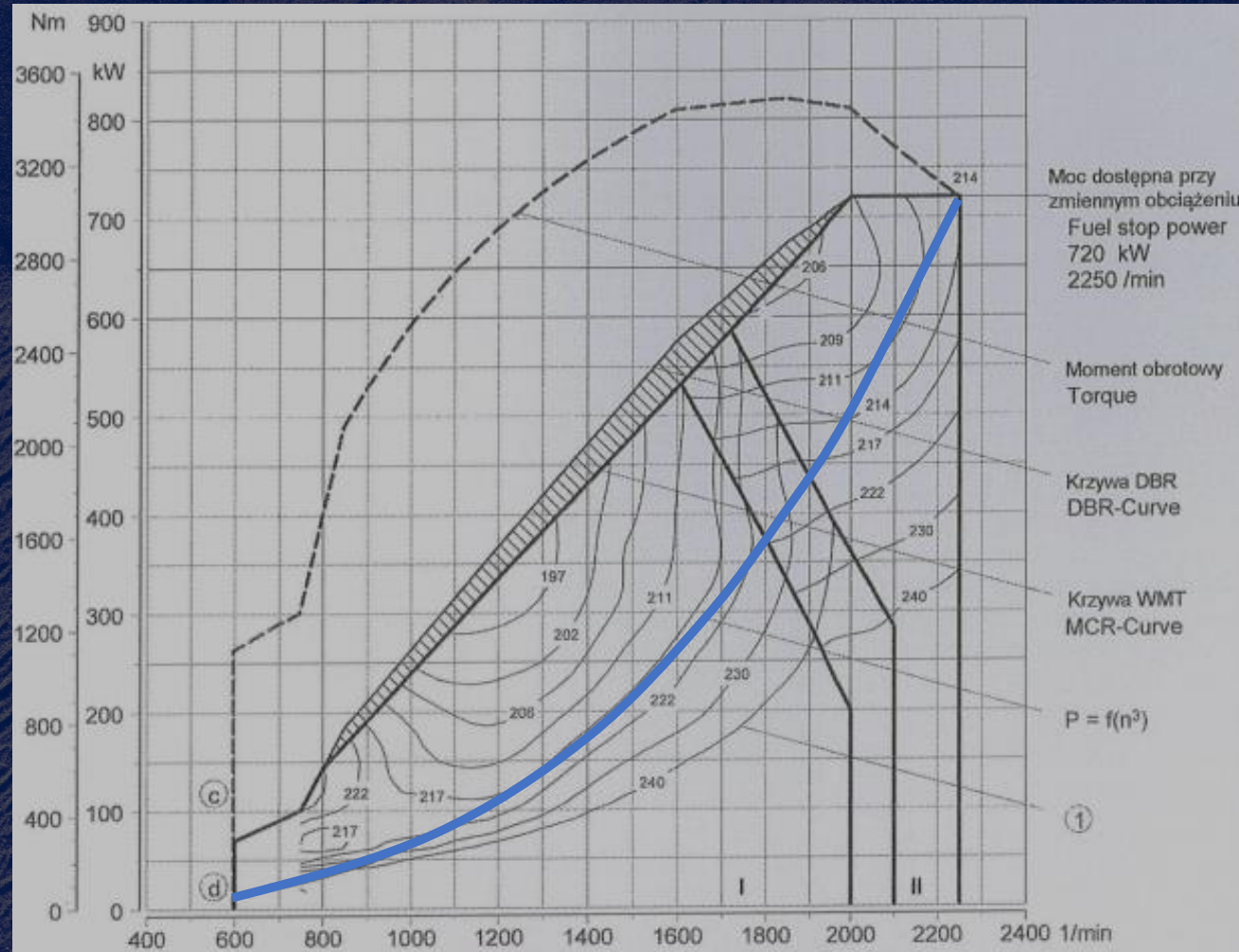
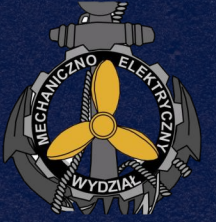
# Warunki obciążeń (ustalone i dynamiczne)



Wartości mocy dla poszczególnych obciążeń silnika określono orientacyjnie dla uśrednionej charakterystyki śrubowej okrętu oraz przy założeniu, że w układzie napędowym okrętu silniki osiągną znamionowy punkt pracy, tzn. dla pełnej wyporności przy znamionowej wartości prędkości obrotowej  $n = 2250$  obr/min silniki osiągną moc znamionową  $P_z = 720$  kW. W rzeczywistości układ silnik – śruba napędowa dobrany jest ze znacznym zapasem mocy (silnik nie jest dociążony).

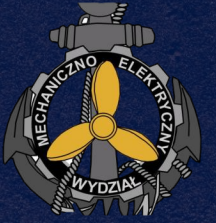


# Warunki obciążeń (ustalone i dynamiczne)



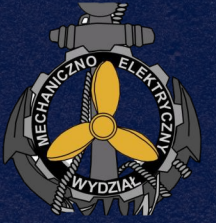


# Warunki obciążeń (ustalone i dynamiczne)

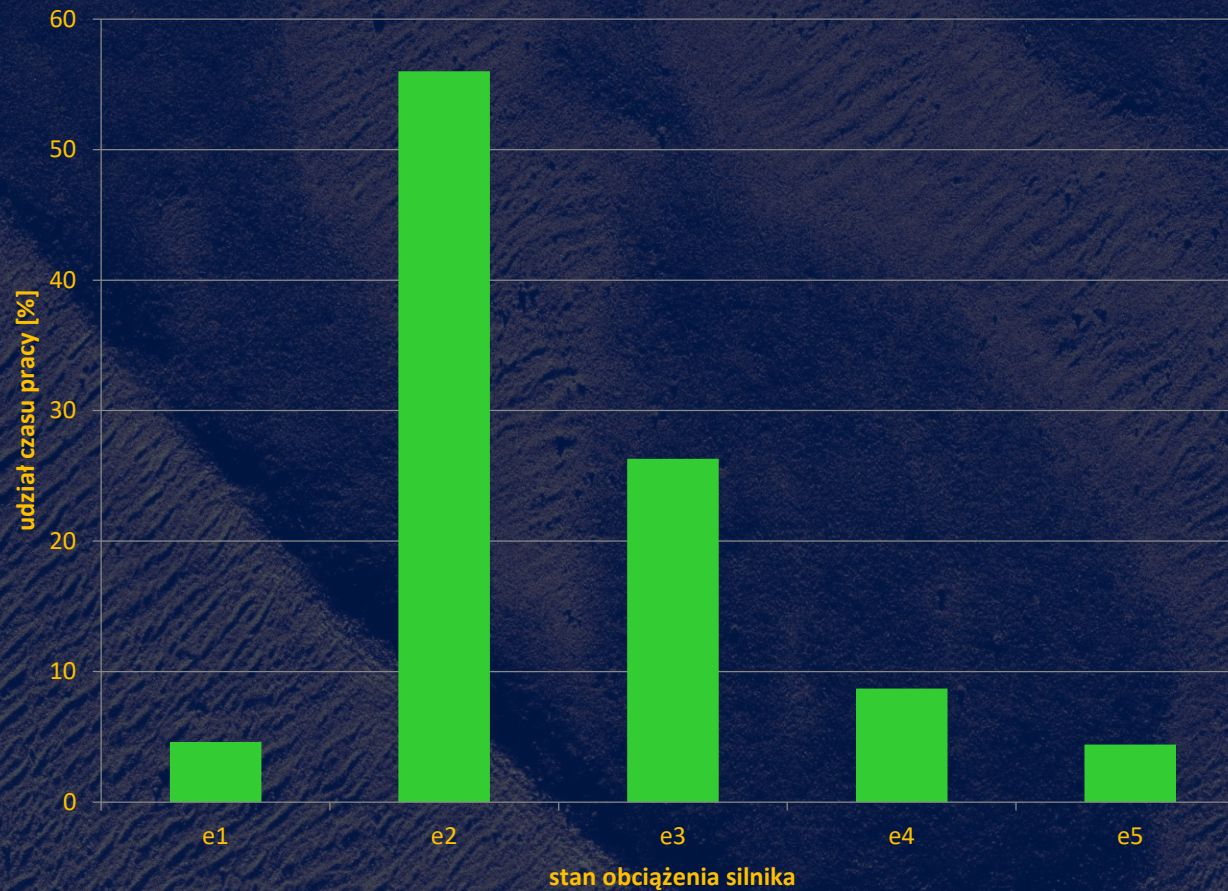


Bilans czasu pracy silników (Źródło: opracowanie własne)

Stan silnika	Moc	Prędkość obrotowa	Średni czas trwania stanu	Średnie odchylenie standardowe	Liczba obserwacji	Udział czasu pracy w stanie	Sumaryczny czas stanu
$e$	$P_e$	$n$	$\bar{t}$	$\sigma$	$N$		$T_i, i = 1, \dots, 6$
[-]	[kW]	[obr/min]	[min]	[min]	[-]	[%]	[min]
<b>silnik Lewa Burta</b>							
$e_1$	0	600	12,82	20,01	156	6,70	2 000
$e_2$	20	600	89,75	126,10	183	55,04	16 425
$e_3$	110	1 200	96,28	151,16	78	25,17	7 510
$e_4$	370	1 800	80,94	53,46	32	8,68	2 590
$e_5$	720	2 250	54,79	62,31	24	4,41	1 315
$e_6$	-	STOP	7 869,21	-	63	-	495 760
<b>silnik Prawa Burta</b>							
$e_1$	0	600	10,62	10,03	129	4,60	1 370
$e_2$	20	600	100,54	131,60	166	56,01	16 690
$e_3$	110	1 200	97,94	148,43	80	26,29	7 835
$e_4$	370	1 800	80,94	53,46	32	8,69	2 590
$e_5$	720	2 250	54,79	62,31	24	4,41	1 315
$e_6$	-	STOP	9 354,72	-	53	-	495 800

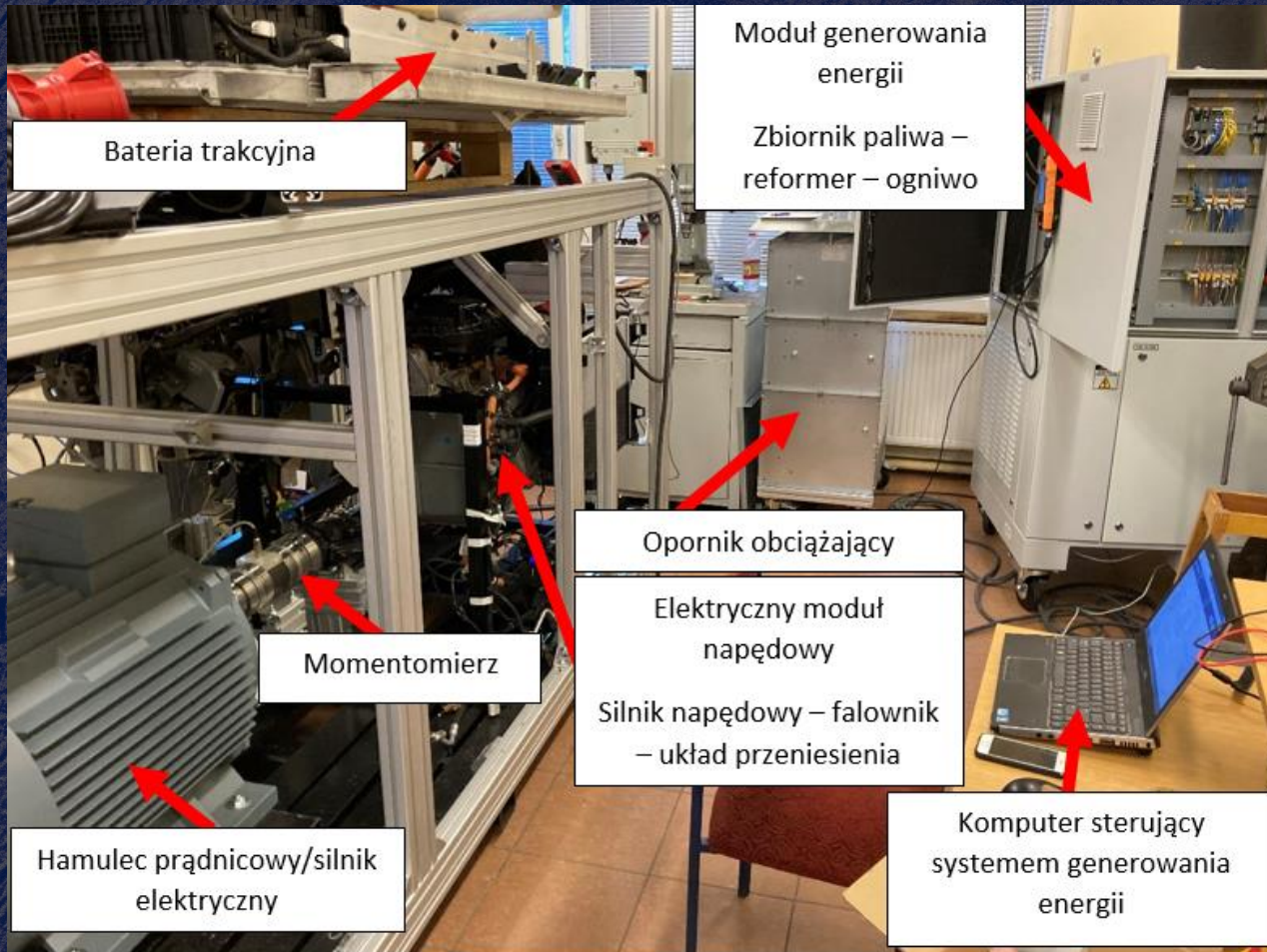


# Warunki obciążeń (ustalone i dynamiczne)

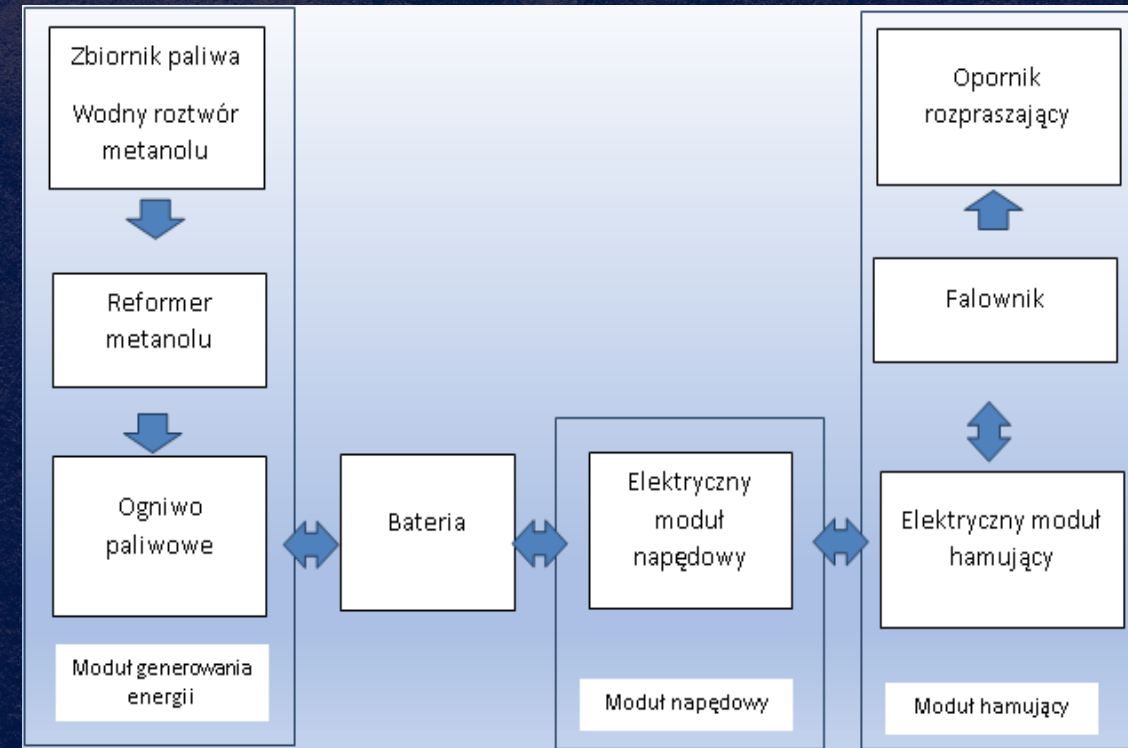


Histogram czasu pracy silników MTU 8V2000 M72 ORP Drużno

# Badania empiryczne (na stanowisku badawczym)



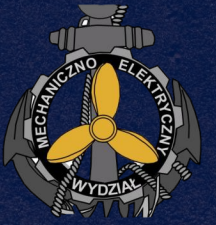
Częściowy wygląd stanowiska badawczego



Schemat modułowy stanowiska badawczego



# Badania empiryczne na stanowisku badawczym



## Parametry techniczne baterii

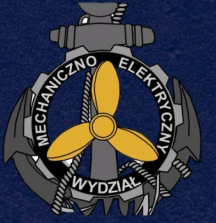
Parametr	Wartość
Pojemność energetyczna całkowita [kWh]	25,92
Pojemność energetyczna eksploatacyjna [kWh]	23,30
Liczba ogniw	192
Napięcie znamionowe pojedynczego ogniwa [V]	3,75
Pojemność znamionowa pojedynczego ogniwa [Ah]	36
Napięcie znamionowe [V]	395
Masa całkowita [kg]	290
Masa ogniw [kg]	165,12

## Parametry techniczne silnika elektrycznego napędowego

Parametr	Wartość
Moc silnika	65 kW przy 3000 obr/min
Moc ciągła silnika	43 kW
Maksymalny moment obrotowy	220 Nm w zakresie prędkości obrotowej wału 250-2500 obr/min



# Badania empiryczne na stanowisku badawczym



1

- Wg planu eksperymentu PS/DK 3<sup>2</sup>

układ	A	B	n [obr/min]	M [Nm]
1	-1	-1	300	20
2	0	-1	750	20
3	1	-1	1200	20
4	-1	0	300	40
5	0	0	750	40
6	1	0	1200	40
7	-1	1	300	60
8	0	1	750	60
9	1	1	1200	60





# Badania empiryczne na stanowisku badawczym



2

- Wg charakterystyki śrubowej

tryb pływania	n [obr/min]	wykorzystanie mocy	moc dla danego trybu [kW]	n [obr/min]	M [Nm]
e1	luz	600	0	400	0
e2	BWN	600	$P = 0,03P_{\max}$	400	1,8
e3	WN	1200	$P = 0,15P_{\max}$	790	18
e4	PN	1800	$P = 0,51P_{\max}$	1200	60
e5	CN	2250	$P = 1,0P_{\max}$	1400	110
OKRĘT				STANOWISKO	



# Badania empiryczne na stanowisku badawczym



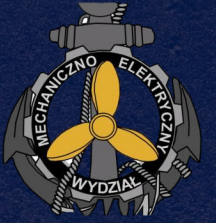
3

- Wg histogramu obciążeń

L.p.	n [obr/min]	M [Nm]	$n/n_e$	$P/P_e$	n [obr/min]	M [Nm]
1	600	20	0,33	0,03	400	1,8
2	800	40	0,44	0,11	530	6,6
3	1000	60	0,55	0,16	660	9,6
4	1200	110	0,66	0,3	790	18
5	1400	170	0,77	0,46	920	27,6
6	1600	260	0,88	0,7	1050	42
7	1800	370	1	1	1200	60
	OKRĘT				STANOWISKO	



# Badania empiryczne na stanowisku badawczym



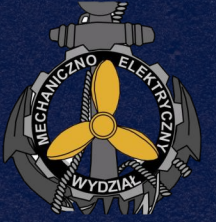
4

- Ładowanie baterii

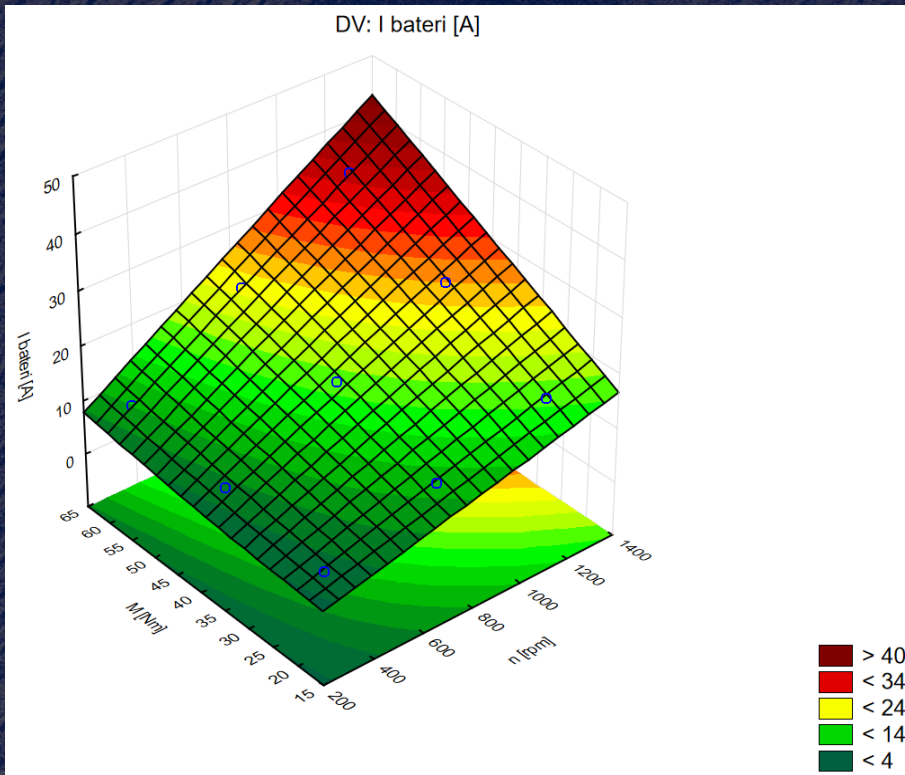
L.p.	godzina pomiaru	delta U [V]	prąd ładowania baterii [A]	poziom naładowania baterii [%]	czas pomiaru [min.]
-	13:01:00	-	start+ preheating	-	36
0	13:34:00	-		46,02	
1	13:37:00	1	2	50,32	8
2	13:45:00	3	4	51,18	23
3	14:07:00	1	6	55,26	7
4	14:17:00	1	8	57,5	10
5	14:25:00	2	10	60,18	8
6	14:35:00	1	12	63,1	10
7	14:47:00	2	13	66,72	12
8	15:24:00	1	6	70,42	37
-	15:24:00	-	chłodzenie	70,42	24
-	15:58:00	-	stop	67,46	



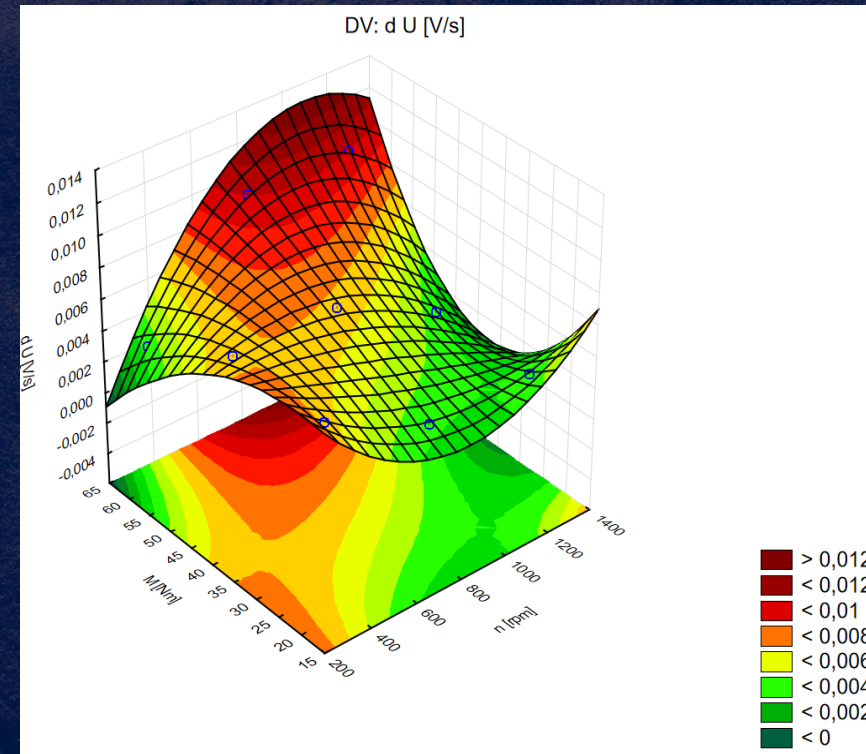
# Wyniki badań



1 • Wg planu eksperymentu PS/DK 3<sup>2</sup>



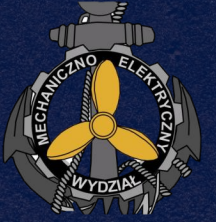
Rys. nr 1.1 Wykres powierzchniowy dla prąd baterii I



Rys. nr 1.2 Wykres powierzchniowy spadek napięcia baterii d U

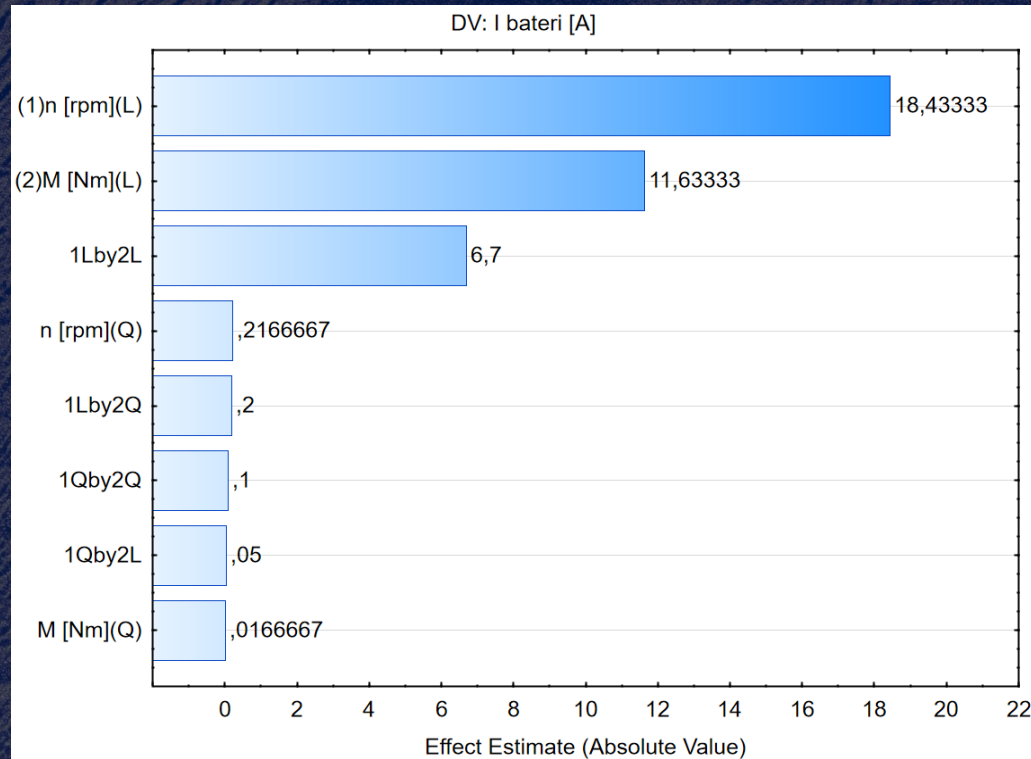


# Wyniki badań

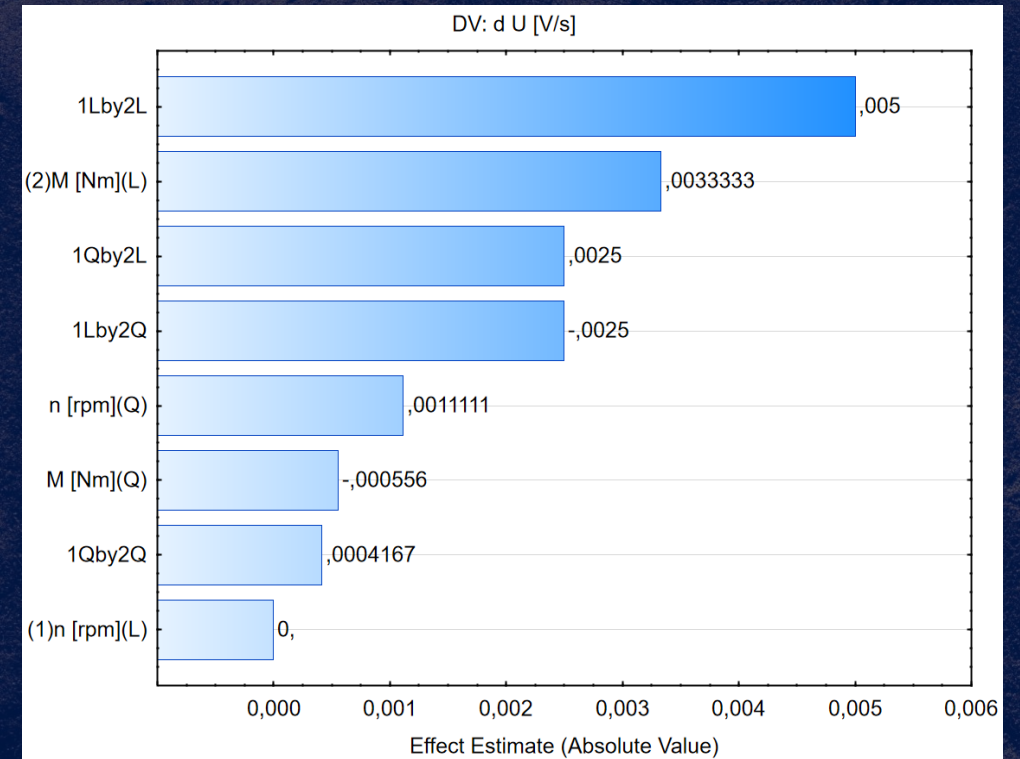


1

- Wg planu eksperymentu PS/DK 3<sup>2</sup>



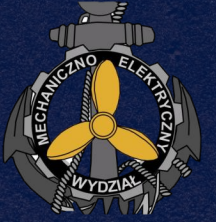
Rys. nr 1.3 Wykres Pareto dla prąd baterii I



Rys. nr 1.4 Wykres Pareto dla spadek napięcia baterii d U

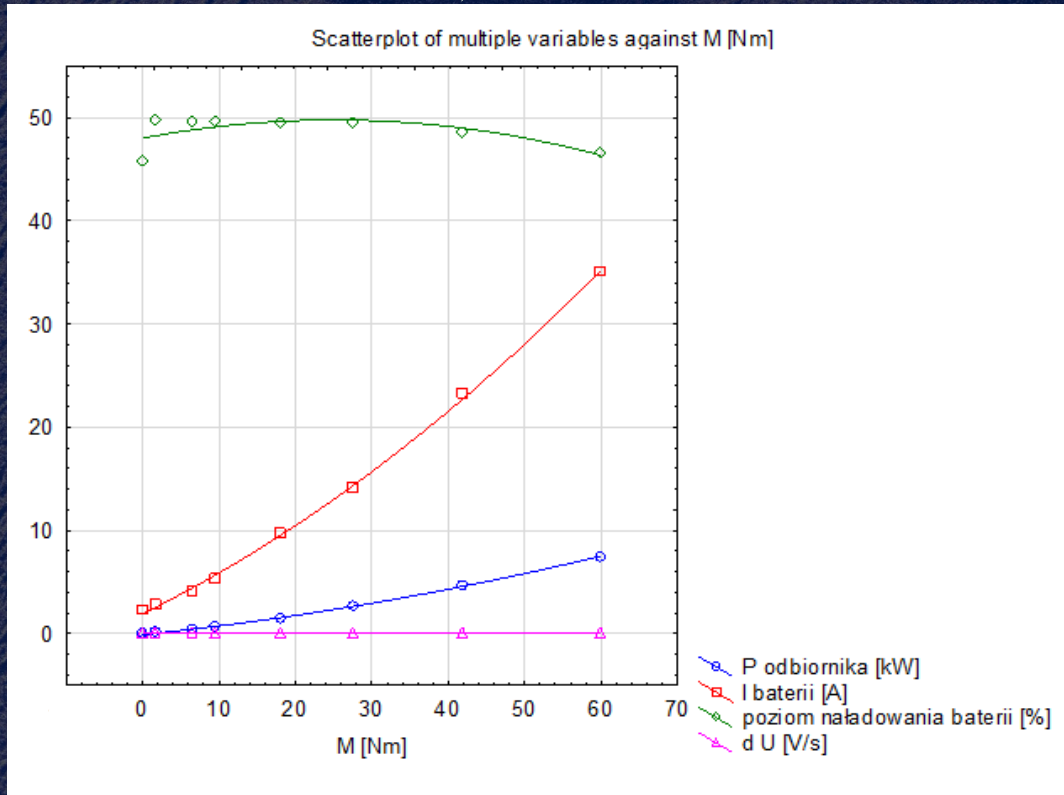


# Wyniki badań

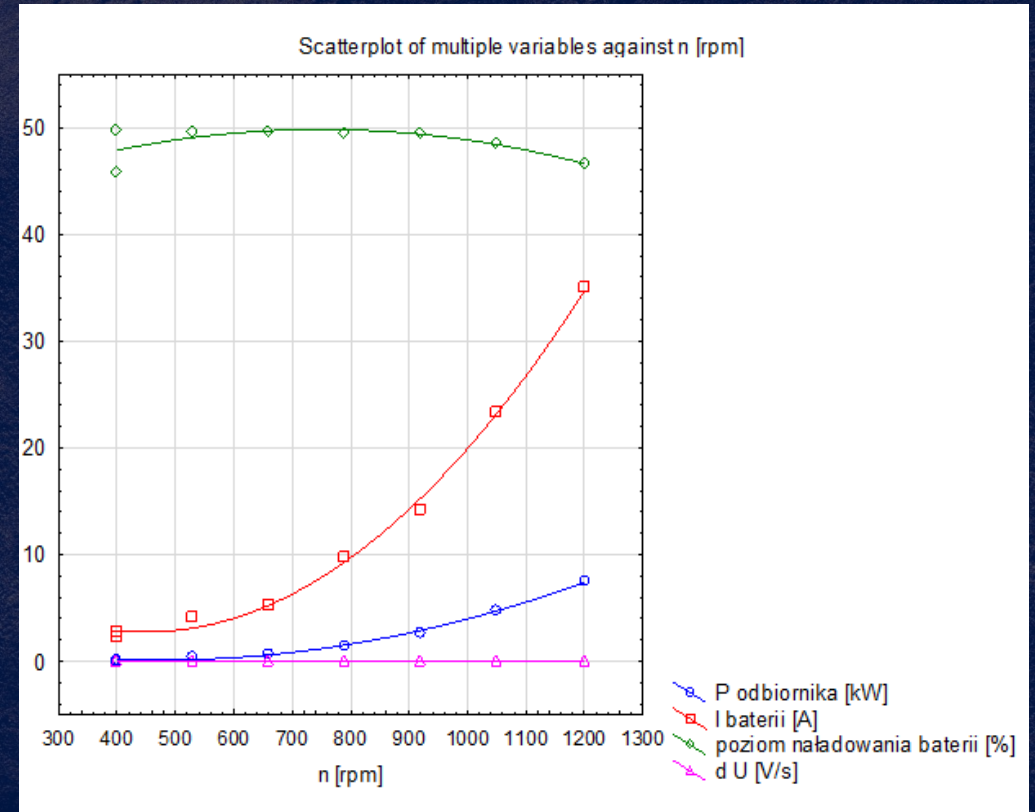


2

• Wg charakterystyki śrubowej



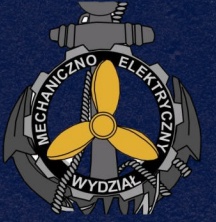
Rys. nr 2.1 Wykres rozrzutu dla moment obrotowy M



Rys. nr 2.2 Wykres rozrzutu dla prędkość obrotowa n

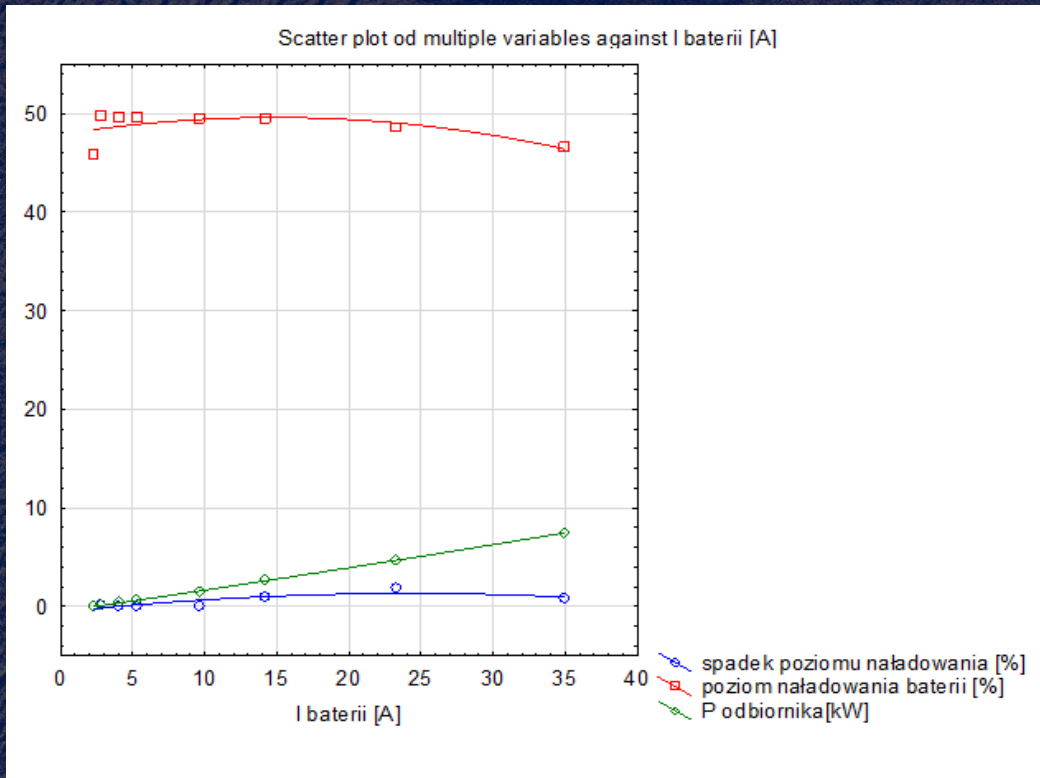


# Wyniki badań

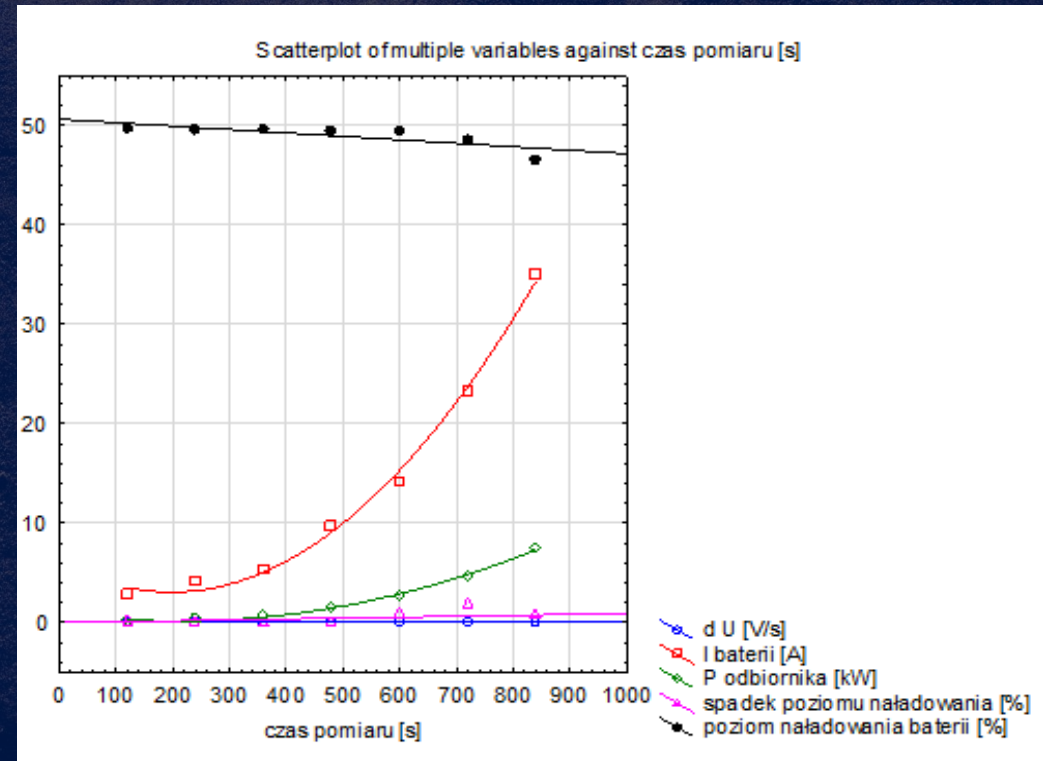


2

• Wg charakterystyki śrubowej



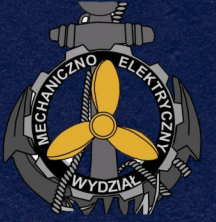
Rys. nr 2.3 Wykres rozrzutu dla prąd baterii I



Rys. nr 2.4 Wykres rozrzutu dla czas pomiaru

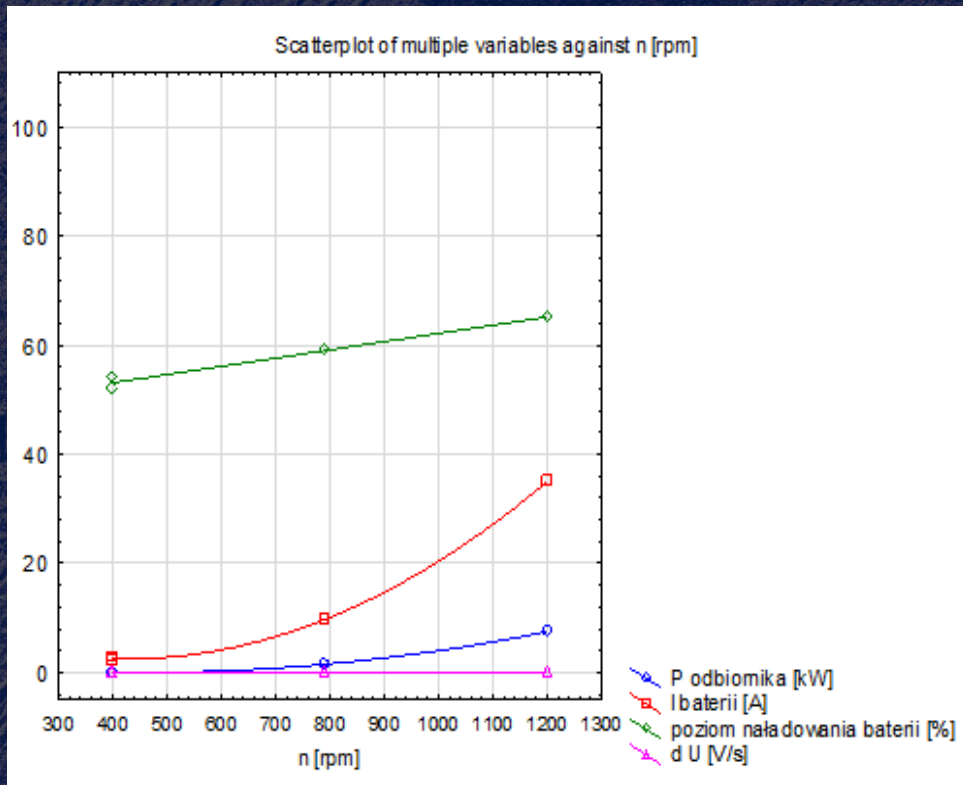


# Wyniki badań

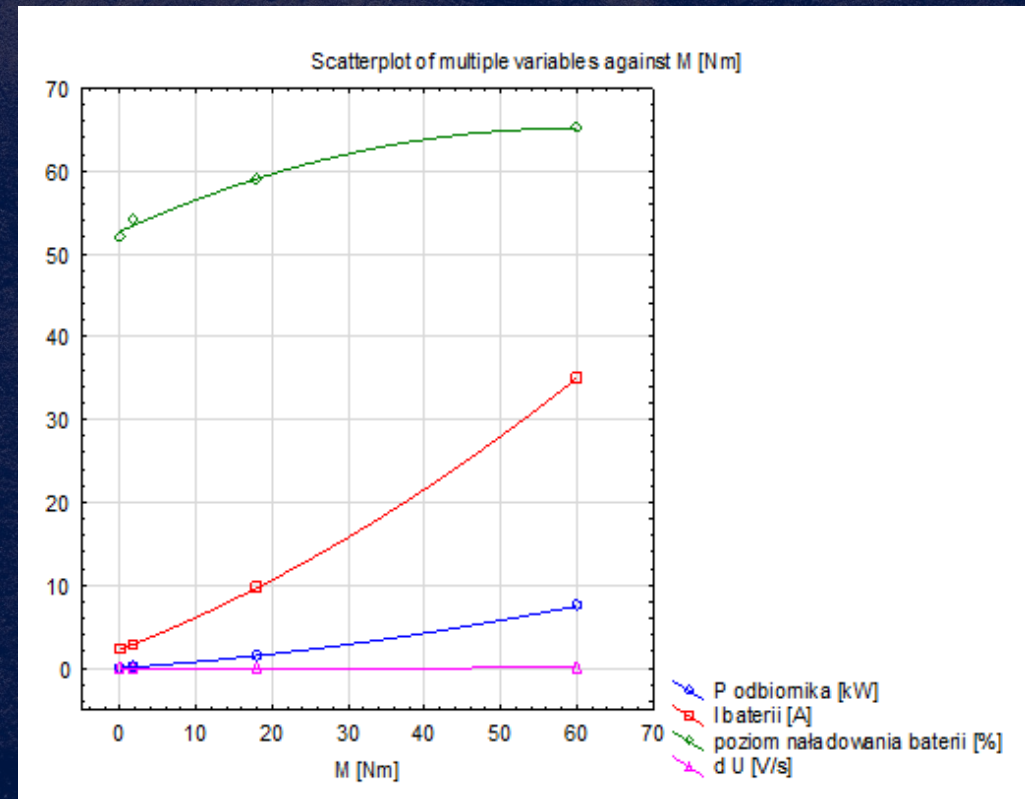


3

• Wg histogramu obciążeń



Rys. nr 3.1 Wykres rozrzutu dla prędkość obrotowa n

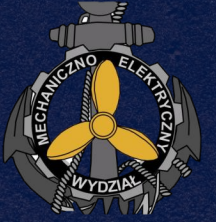


Rys. nr 3.2 Wykres rozrzutu dla moment obrotowy M



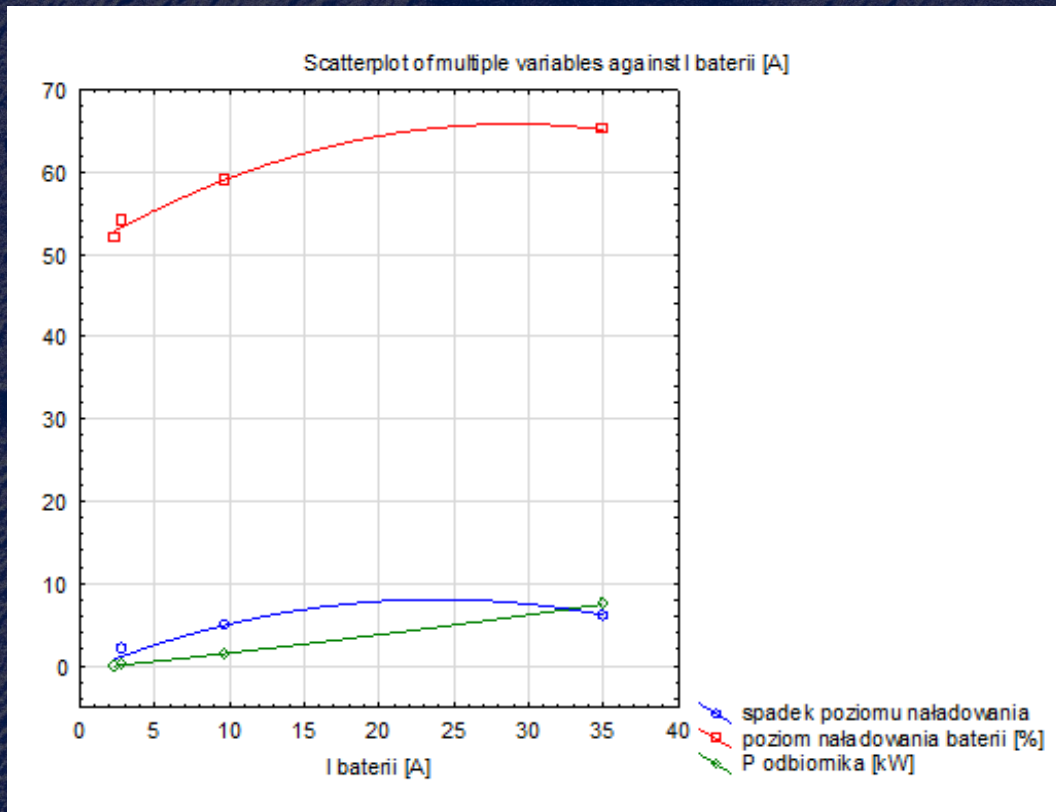


# Wyniki badań

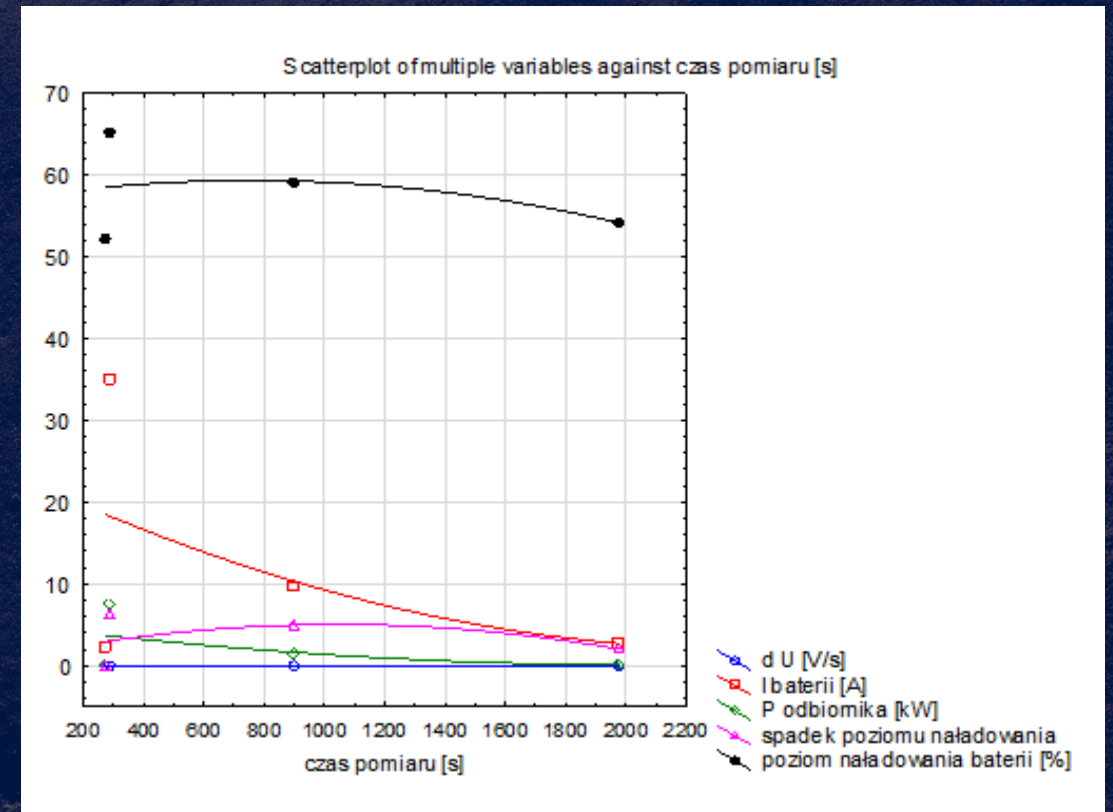


3

• Wg histogramu obciążeń



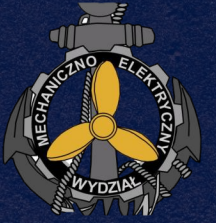
Rys. nr 3.3 Wykres rozrzutu dla prąd baterii I



Rys. nr 3.4 Wykres rozrzutu dla czas pomiaru

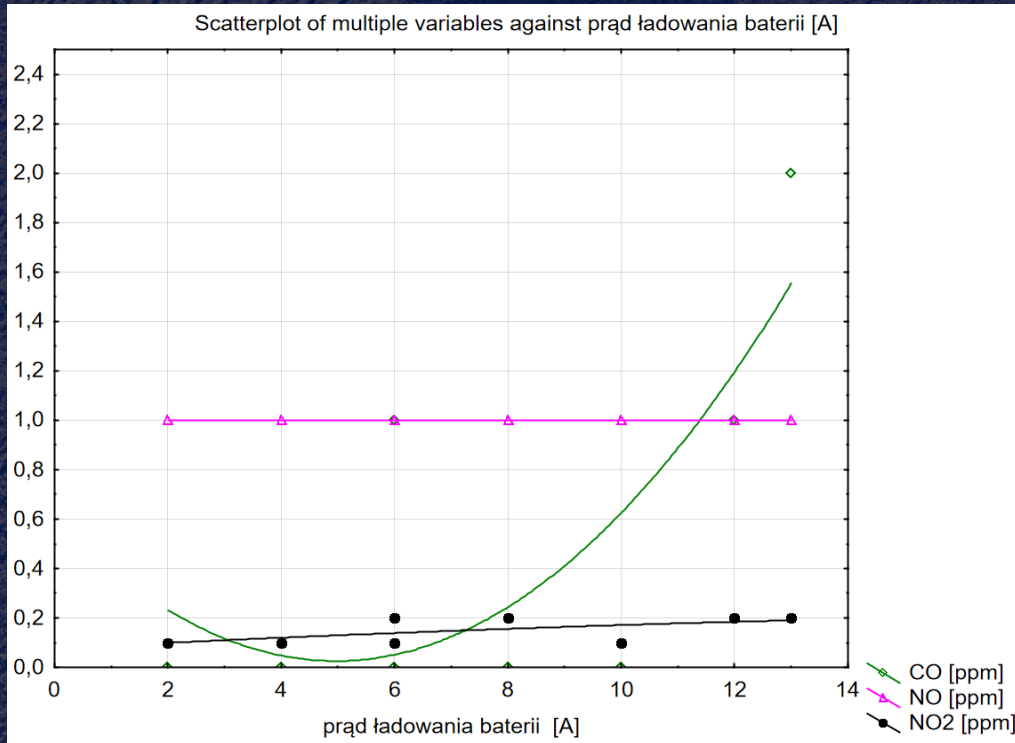


# Wyniki badań

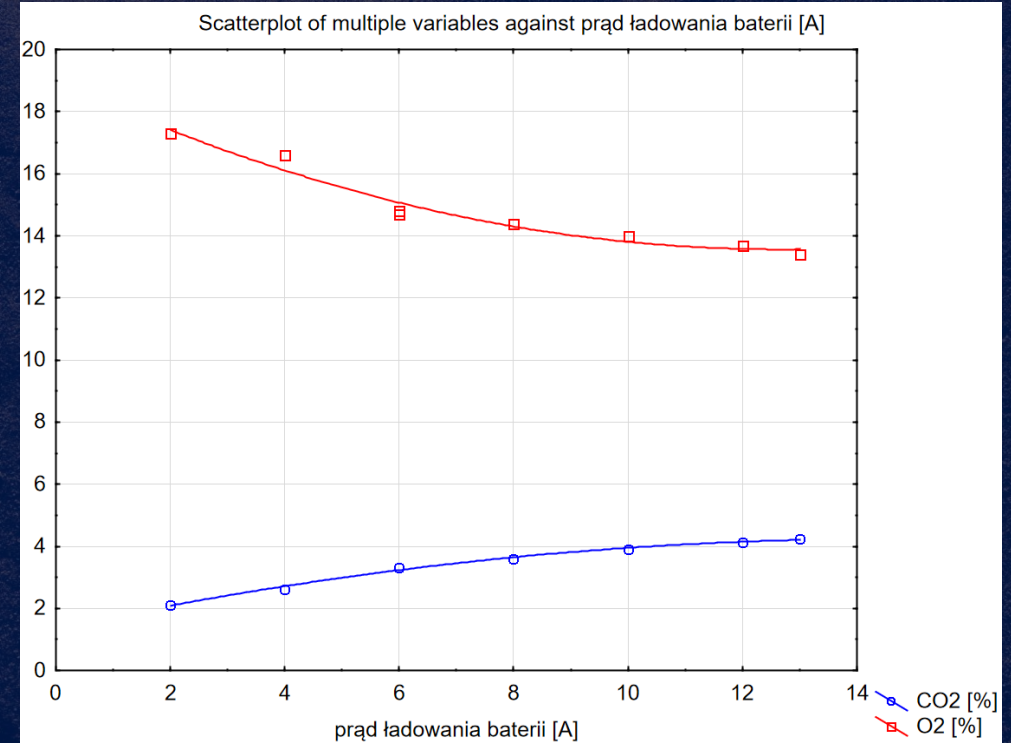


4

Ładowanie baterii



Rys. nr 4.1 Wykres rozrzutu dla prąd ładowania baterii I



Rys. nr 4.2 Wykres rozrzutu dla prąd ładowania baterii I

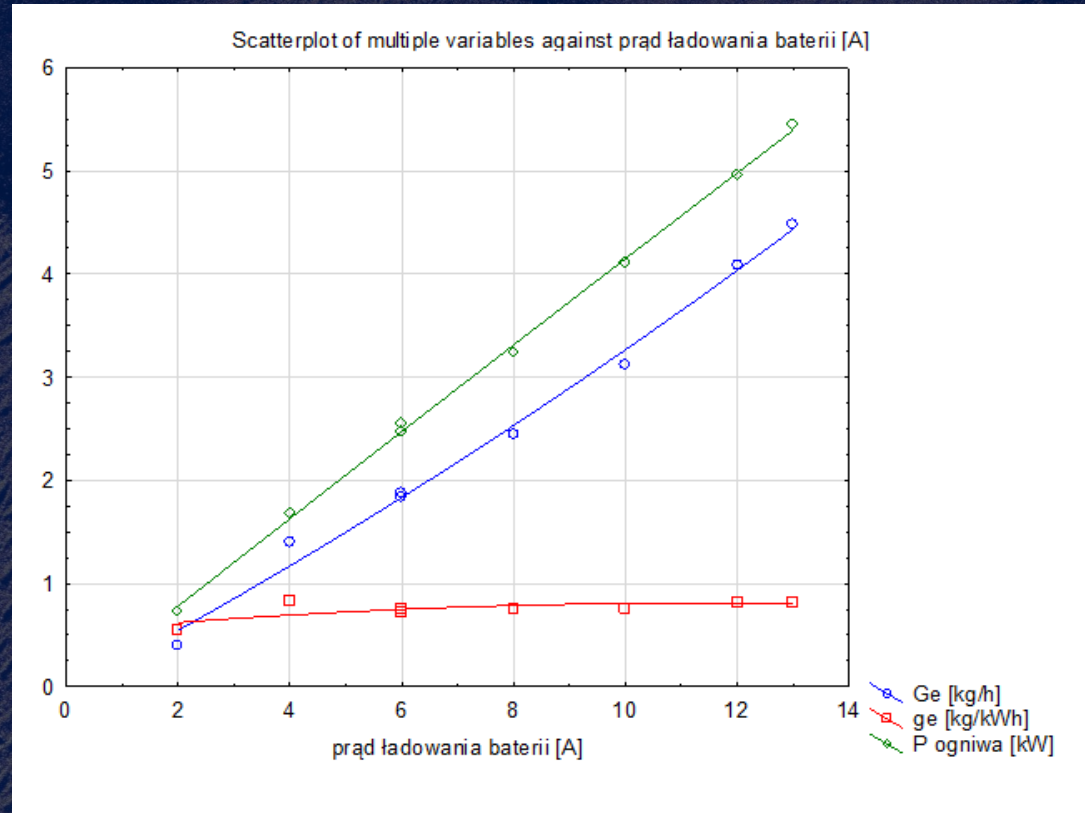


# Wyniki badań



4

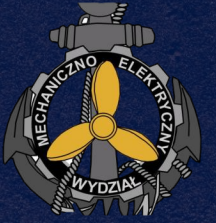
• Ładowanie baterii



Rys. nr 4.3 Wykres rozrzutu dla prąd ładowania baterii I

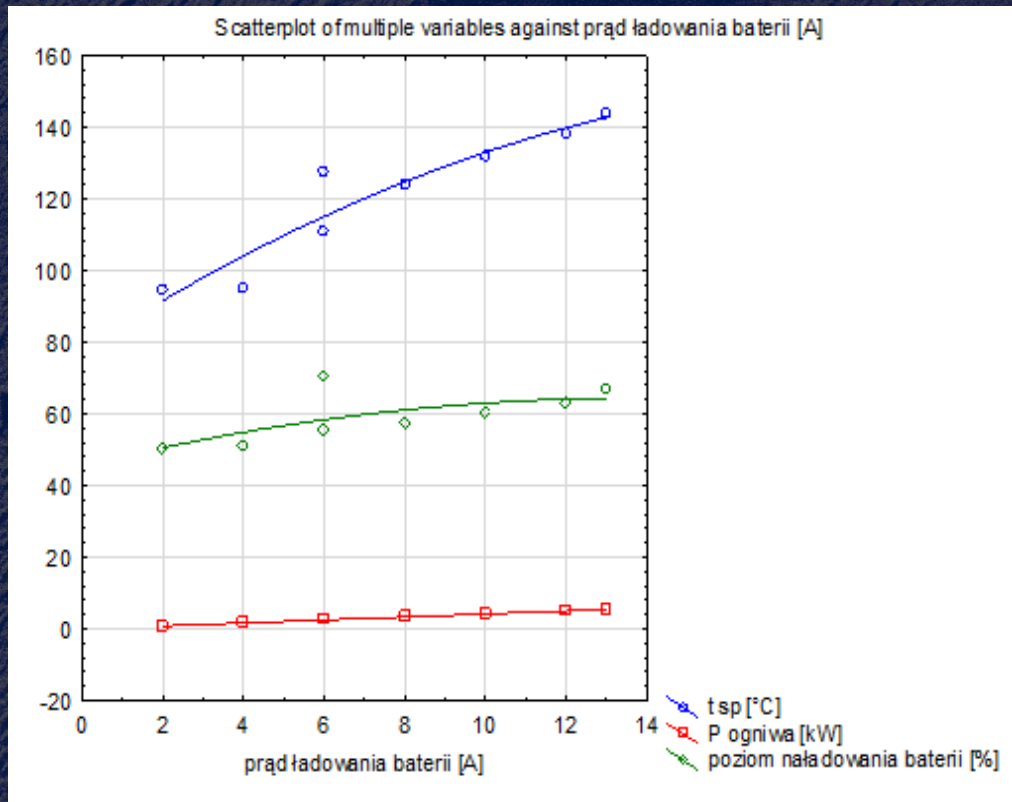


# Wyniki badań

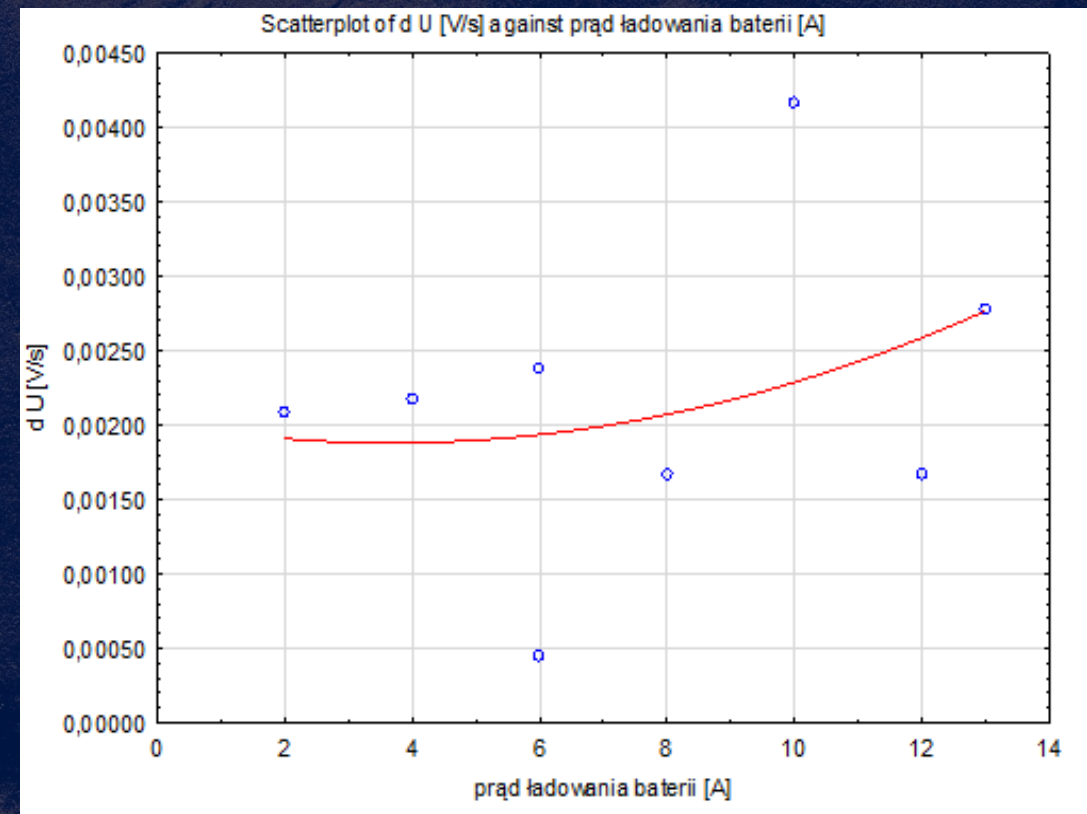


4

Ładowanie baterii



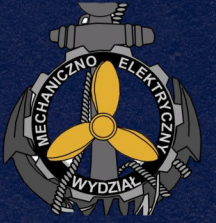
Rys. nr 4.4 Wykres rozrzutu dla prąd ładowania baterii I



Rys. nr 4.5 Wykres rozrzutu dla prąd ładowania baterii I



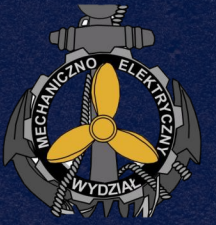
# Wnioski



1. Obiekt badań powinno analizować się w oparciu o jego specyficzny charakter obciążenia.
2. Okręt ponad 50% czasu realizacji zadania pływa w trybie bardzo wolno naprzód (BWN). Spadek napięcia baterii, dla tego trybu, jest najmniejszy i wynosi dla badanego obiektu 1,263 mV/s.
3. Jak wynika w wykresów Pareto, największy wpływ na badane wielkości mają prędkość obrotowa i moment obrotowy, natomiast w dużo mniejszym stopniu istotne są ich interakcje liniowe i kwadratowe.
4. Spadek napięcia baterii jest najmniejszy dla dużych obciążeń i jednocześnie małych prędkości obrotowych lub małych obciążeń i dużych prędkości obrotowych.

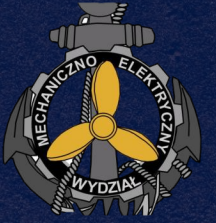


# Wnioski

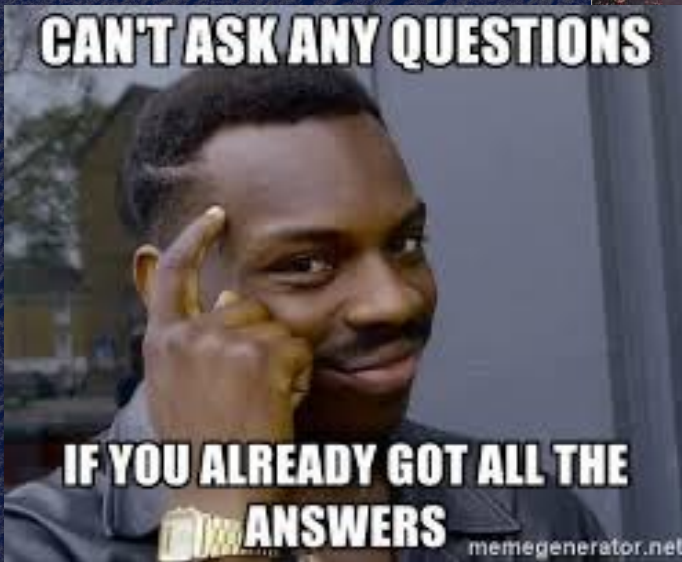


5. Zarówno prąd baterii  $I_{bat}$  jak i spadek napięcia baterii  $dU$  wykazują największe korelacje z pozostałymi wielkościami mierzonymi.
6. Wielkości wartości mierzonych związków toksycznych spalin są bliskie zeru, co wynika z charakteru spalania metanolu oraz wpływa korzystnie na zmniejszenie ich emisji do atmosfery.

**Kolejny krok:** opracowanie „Modelu optymalizacji doboru parametrów bufora bateryjnego”.



# *Dziękuję za uwagę*



JAWNE



17.11.2023

31