

INVESTIGATION OF PERFORMANCE INDICATORS OF A HYBRID POWERED ELECTRIC VESSEL UNDER DIFFERENT OPERATING MODES¹

Eng. Valeri Georgiev, PhD

Department of Transport,

“Angel Kanchev” University of Ruse

Tel.: +359 878 959709

E-mail: valerigeorgiev58@gmail.com

Abstract: With carbon neutrality targets set in the European Green Deal, the transition to green drives in water transport is inevitable. For this purpose, studies of different types of drives and power supplies are needed, and an objective assessment of their applicability.

The report examines the results of an experimental study of the energy consumption of a hybrid solar-powered vessel. For this purpose, tests were conducted in which the relationship between the vessel's traction force and the energy consumed was determined. As a result of the research, it was determined how to efficiently use the energy from the sun in operation.

Keywords: Hybrid Powered, Energy Effectiveness, Solar Power, Greenhouse Gases Reduction

ВЪВЕДЕНИЕ

С приемането на Европейската Зелена сделка през 2019г. (European Union, 2019) Европейският Съюз залага амбициозната цел за климатична неутралност до 2050г. По отношение на транспорта стремежът е за 90% намаляване на емисиите на парникови газове до 2050 г. Стратегията за устойчива и интелигентна мобилност на Европейската комисия (European Commission, 2020) се базира на изграждането на напълно работеща мултимодална Транс-Европейска транспортна мрежа (TEN-T) за устойчив и интелигентен транспорт с висока свързаност до 2050г. Заложените стъпки до 2030г. са - удвояване на високоскоростния железопътен трафик, както и увеличаване на транспорта по вътрешни водни пътища, и морския транспорт на къси разстояния с 25%. Последователните проучвания за парникови газове на Международната морска организация (IMO) за периода 1996-2018г. показват, че основният разход на енергия за всички типове кораби остава задвижването (International Maritime Organization, 2000, 2009, 2014, 2020).

Тъй като ЕС е част от Международната Конвенция за предотвратяване на замърсяването от кораби (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)) е необходимо да бъдат редуцирани емисиите от съществуващите плавателните съдове чрез модернизиране и преоборудване, както и да бъдат разработени нови нулево-емисионни системи (Seongwan K. et. al., 2018). Това от своя страна дава тласък в научноизследователската дейност и разработката на иновативни, неконвенционални задвижвания (Royal Dutch Shell plc et. al, 2020).

Именно това е целта на проекта за плавателен съд **HydRuForce** - инициран и финансиран по „Национална научна програма за нисковъглеродна енергия за транспорта и бита Е+“ – проектирането и създаването на нулево-емисионно задвижване за демонстрационен плавателен съд с оглед доказване на приложността и възможностите за мащабиране на иновативни хибридни системи за захранване.

¹ Докладът е представен на научна сесия на 27 октомври 2023 с оригинално заглавие на български език: ИЗСЛЕДВАНЕ РАБОТНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА ХИБРИДНО ЗАХРАНВАН ПЛАВАТЕЛЕН СЪД ПРИ РАЗЛИЧНИ РЕЖИМИ НА РАБОТА

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Същност на HydRuForce.

Проектът HydRuForce е резултат от сътрудничеството между Русенски Университет „Ангел Кънчев“, Община Силистра, Министерство на Образованието и Науката, Технически Университет София, Българска Академия на Науките и Община Русе. Основата за него е тримаранен понтон, оборудван с фотоволтаична инсталация. За целите на задвижването е надграден с 2 броя електродвигатели, хибридни инвертори/зарядни устройства и литиево-желязо-фосфатни акумулаторни блокове.



Фиг. 1. Демонстрационен плавателен съд HydRuForce при експериментално плаване

2. Технически характеристики на изследвания плавателен съд (тримаран).

Размерите на тримарана са:

Дължина – 10,5m;

Ширина – 4,5m;

Височина – 2,5m;

Маса – 3,5t.

Капацитетът му е 12 пасажери а необходимият екипаж е един капитан. Задвижването е обезпечено от два електродвигателя **EZ Outboard Sport 20HP**, всеки с максимална мощност 10,56kW и захранван от 16 модулна акумулаторен блок с капацитет 19,2kW. Необходимата енергия за акумулаторните блокове се доставя от 24 модулна фотоволтаична инсталация с мощност 6kW чрез два хибридни инвертора/зарядни устройства MPP Solar PIP-5048MK. Основните характеристики на отделните компоненти на системата са представени в таблици от 1 до 4, а самите те на фиг. 2 и 4.

Таблица 1.

Основни характеристики на електромотор Golden Motor EZ Outboard Sport 20HP

Номинално Напрежение (V)	48
Входящ ток (A)	220
Еквивалентна мощност (HP)	20
Скорост на витлото (min^{-1})	2500
Сила на тягата (N)	1150
Размер на витлото (m)	0.23495 X 0.1778
Управление	Щурвал
Накланяне	Ръчно
Маса (kg)	48



Фиг. 2. Електродвигатели Golden Motor EZ Outboard Sport 20HP, задвижващи плавателния съд HydRuForce

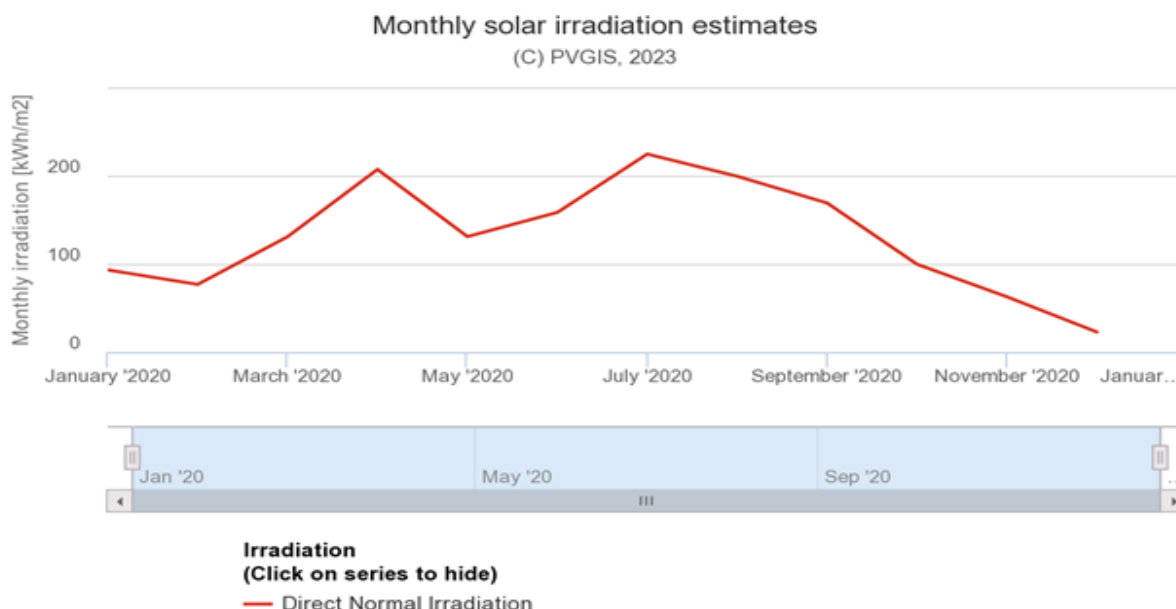
Скоростта на всеки електродвигател се регулира от контролер посредством дистанционен джойстик. Електродвигателите разполагат с предварително програмирани три режима на работа – Икономичен (Eco), Нормален (Normal) и Спорт (Sport), като при първия режим мощността е ограничена до 25% или $\sim 2,64\text{kW}$, при нормален режим до 60% или $\sim 6,34\text{kW}$, а при спортен - без ограничение до пълния капацитет от $10,56\text{kW}$. Това показва, че избраните електромотори са оптимизирани за различни приложения в разнообразна работна среда.

Енергийната система е изградена в два низа като към всеки от хибридните инвертори паралелно са свързани 12 паралелно-последователно свързани фотоволтаични модула, по един 16 модулен акумулаторен блок, и един електродвигател със съответния джойстик за управление към него. Основното захранване за акумулаторните блокове се осигурява от фотоволтаичните панели като чрез интелигентна система за управление на енергията (EMS).

Основни характеристики на батериите използвани в акумулаторните блокове (2 блока по 16 модула)

Модел	LFP400AHА	Алтернативна продуктова маркировка TS-LFP400AHА, TS-LYP400AHА
Номинално напрежение (V)	3,3	Работното напрежение под товар е 3,0 V
Капацитет (Ah)	400	+/- 5%
Работно напрежение (V)	max 3,8 - min 2,8	При 80% дълбочина на разреждане
Напрежение на дълбоко разреждане (V)	2,8	Клетката се поврежда, ако напрежението падне под това ниво
Максимално зарядно напрежение (V)	3,8	Клетката се поврежда, ако напрежението надвиши това ниво
Оптимален разряден ток (A)	< 200	0,5 C
Максимален ток на разреждане (A)	< 1200	3 C, непрекъснато за максимум 15 минути от пълно зареждане
Максимален пиков ток на разреждане (A)	< 4000	10 C, максимум 5 секунди в една минута
Оптимален заряден ток (A)	< 200	0,5 C
Максимален заряден ток (A)	< 1200	< 3 C, със следене на температурата на батерията
Максимална продължителна работа Температура (°C)	65	Температурата на батерията не трябва да се повишава до това ниво по време на зареждане и разреждане
Размери (Ш * В * Д) (mm)	461 * 285 * 65	Милиметри (толеранс +/- 2 mm)
Маса (kg)	13,5	Килограми (допустимо отклонение +/- 150 g)
Оптимална сила на въртящия момент (Nm)	45 - 50	

Изградената по този начин система за задвижване е отличен пример за това как възобновяеми енергийни източници могат да бъдат интегрирани за ефективно захранване на транспорта (Zahedi, B. 2014). Нулевите въглеродни емисии на кораба го правят чиста алтернатива за транспорт по вътрешни водни пътища и защитени ареали като резервати и езера (Sofiev, M. et. al. 2018). За да се оцени потенциалът на фотоволтаичната инсталация за захранване на плавателния съд трябва да се вземат предвид нивата на слънчева радиация в района на плаване за периода на експлоатация, а именно месеците от април до септември. Според данните от 2020г. пик на радиацията има през април, юли и август с нива от повече от 200 kWh/m² за месец (Solargis s.r.o., 2023, European Comission, 2022). Останалите месеци се характеризират с нива от около 150 kWh/m². На фиг. 3 са представени данните за слънчевата радиация за периода от м. Януари до м. Декември 2020г.



Фиг. 3. Стойности на директна слънчева радиация за периода от м. Януари до м. Декември 2020г.

Таблица 3.

Основни технически характеристики на фотоволтаичните панели

Технически данни на фотоволтаичните панели	
Максимална мощност - P _{max} (W)	250
Работно напрежение - V _{mp} (V)	~ 30
Работен ток – I _{mp} (A)	~ 8,35
Напрежение на отворена верига - V _{oc} (V)	37,1
Ток на отворена верига - I _{oc} (A)	8,92
Ефективност на модула – η (%)	~ 17-20
Температурен коефициент – P _{max} (%/°C)	-0,40
Максимално системно напрежение	PV-1000
Размери (mm)	1640 x 992 x 40
Маса (kg)	19
Рамка	Анодизиран алуминий
Стъкло	Закалено, антирефлексивно

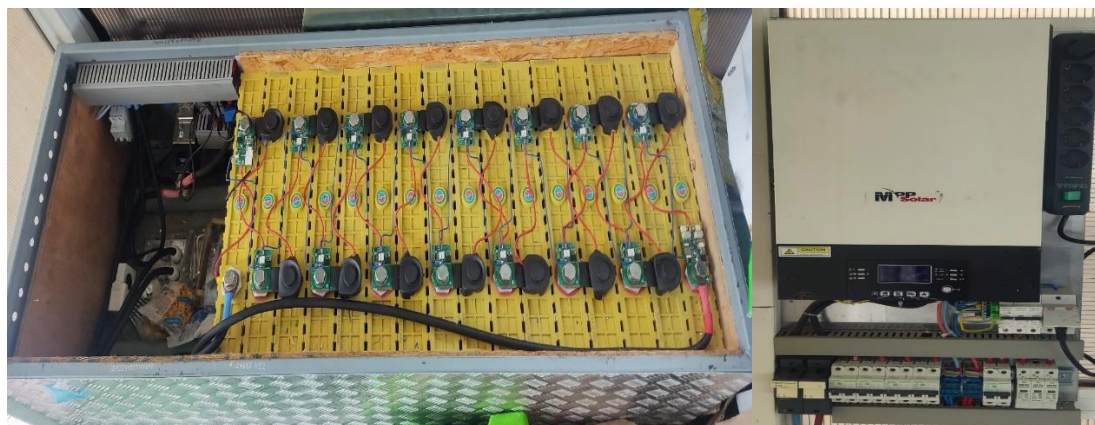
Според представените данни може да се изчисли теоретично количеството електроенергия, която би генерира фотоволтаичната инсталация, като трябва да се вземат предвид освен ефективността на панелите и тази на инверторите. Спрямо инсталираните мощности формулата е следната

$$P_{PV} * \eta = P_{eff} \cdot (W), \quad (1)$$

където $P_{PV}, (W)$ е енергията произведена от фотоволтаичната инсталация;

$\eta, (%)$ - ефективността на инвертора в линеен режим;

$P_{eff}, (W)$ - произведената ефективна електроенергия.



Фиг. 4. 16-модулен **LiFePO₄** акумулаторен блок на плавателния съд (вляво). Хибриден инвертор зарядно MPP Solar PIP-5048MK (вдясно)

Таблица 4.

Технически характеристики на хибриден инвертор зарядно MPP Solar PIP-5048MK

Електрически данни:	
Номинална Мощност	5000 W
Възможност за паралелна работа	Да, до 9 единици
Фактор на входната мощност	1
Диапазон на входното напрежение	110-280V AC
Входна/изходна честота	50Hz / 60Hz
Изходно напрежение	230V AC±5%
Форма на изходната вълна	Чиста синусоида
Изходно късо съединение	Прекъсвач
Пикова ефективност	94% (в линеен режим) / 90% (в инверторен режим)
Номинално напрежение (DC)	48V
Максимално входящо напрежение (DC)	66V
Номинално напрежение	48 V
Максимално напрежение на зареждане	64V
Време за прехвърляне	0ms
Зарядно устройство (Фотоволтаичен и Променлив ток)	
Алгоритъм за зареждане	MPPT
Максимална мощност на фотоволтаичната инсталация	4000W
Максимално напрежение от PV вход	140V DC
MPPT Обхват	60-115V DC
Максимално слънчево зареждане	80A
Максимално зареждане AC	60A

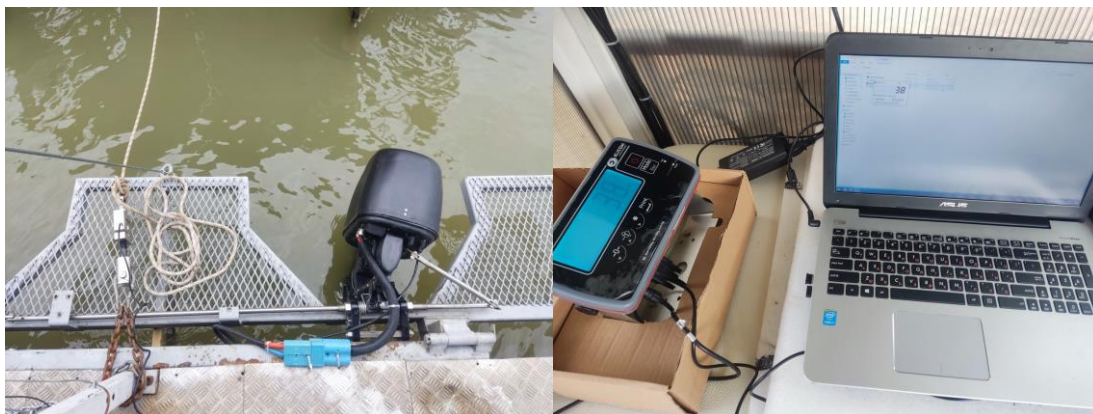
3. Методика на изследването.

Обектът на това изследване – плавателният съд HydRuForce е електрически катамаран с хибридно хранване, което съчетава електрически двигатели, хранвани от батерии с фотоволтаични панели за зареждането им. Неговият дизайн и оперативни възможности го правят идеален кандидат за изследване на ефикасността и ефективността на хибридни морски системи за задвижване. Целта е да се постигне енергийна независимост на възможно най-високо ниво.

Проведени се поредица от контролирани експериментални плавания, за да се оцени ефективността на HydRuForce при всеки режим на работа. Тези изследвания са предназначени да симулират типични оперативни сценарии, включително вариации в скоростта, натоварването и водните условия. Ефективността на тримарана се оценява чрез множество опити, за да се гарантира надеждността на данните. За определяне на енергийната

характеристика на плавателния съд са направени множество изпитателни плавания в реални условия при различни режими на двигателите. Чрез приложението EZ-Outboard, достъпно от производителя, са събрани данни за скоростта на плавателния съд, скорост на въртене на електродвигателите, разход на енергия, температура на моторните контролери и на самите електродвигатели, работно напрежение и големина на тока. За нагледно представяне данните са осреднени и представени чрез диаграми.

За измерването на теглителната сила към плавателния съд е монтиран тензометричен сензор, свързан към електронна везна, а данните са събрани чрез специално проектиран за сензора софтуер. Системата е показана на Фиг. 5. Изследванията са проведени многократно в реални условия и при различни работни режими и различни натоварвания на електродвигателите. Резултатите са представени чрез диаграми.

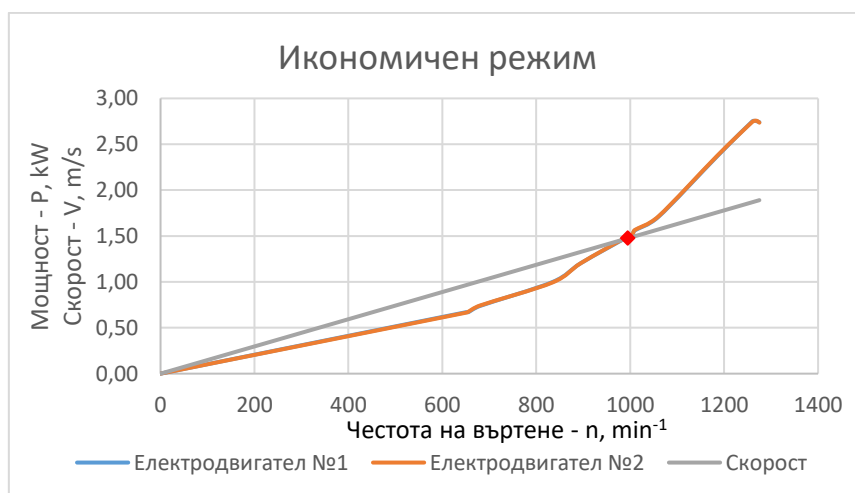


Фиг. 5. Тензометричен сензор монтиран на плавателния съд (вляво) и електронна везна заедно със софтуера за събиране на данни (вдясно)

Резултатите се интерпретират, за да осигурят представа за оптималното използване на хибридната система за захранване на HydRuForce. Констатациите имат за цел да допринесат за по-широкото разбиране на хибридните системи за захранване в плавателните съдове и техния потенциал за намаляване на въздействието върху околната среда на водния транспорт.

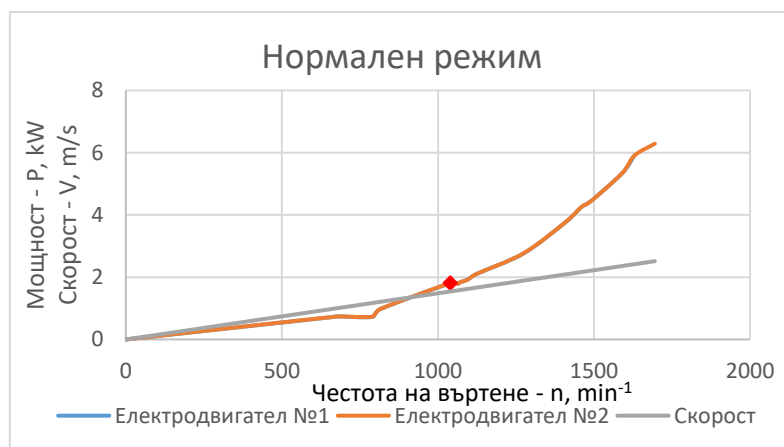
4. Данни от изследването

Обобщените данни от плаванията са представени чрез диаграми на Фиг. 6, 7 и 8, а тези от измерванията на теглителната сила на Фиг. 9, 10 и 11.



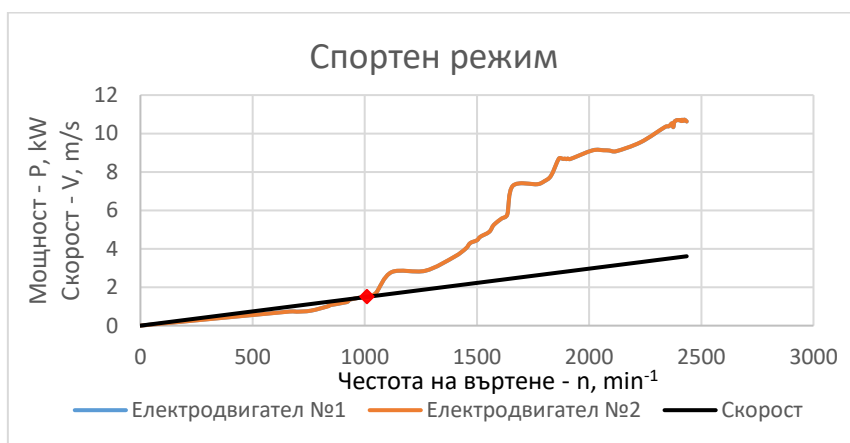
Фиг. 6. Отношение на консумираната мощност и скоростта на плавателния съд от скоростта на въртене на електродвигателите при работа в Икономичен режим

Фиг. 6 представя обобщените данни от изследването на работата на електродвигателите в Икономичен режим. Електродвигател №1 е разположен ляво на борд, а Електродвигател №2 дясно на борд. Двата оперират в почти пълен синхрон, а работата им се характеризира с пик на мощността от 2,76kW при 1265-1270min⁻¹. Това е така, заради ограничението на допустимата мощност до 25% в този режим. Скоростта, която достига плавателният съд при тази мощност е 1,87m/s. Оптималната ефективност се постига при 995min⁻¹, където се пресичат правата на скоростта и кривите на мощността на електродвигателите. Скоростта там е 1,48m/s за мощност от 1,49kW. За всички изследвани скорости на въртене температурата на моторите варира между 13 и 26°C, а тази на контролерите от 10 до 19°C. Работното напрежение и за двата се изменя от 50 до 52,3V, а големината на тока, която е и определяща за разхода на електроенергия - от 0 до 55,1A.



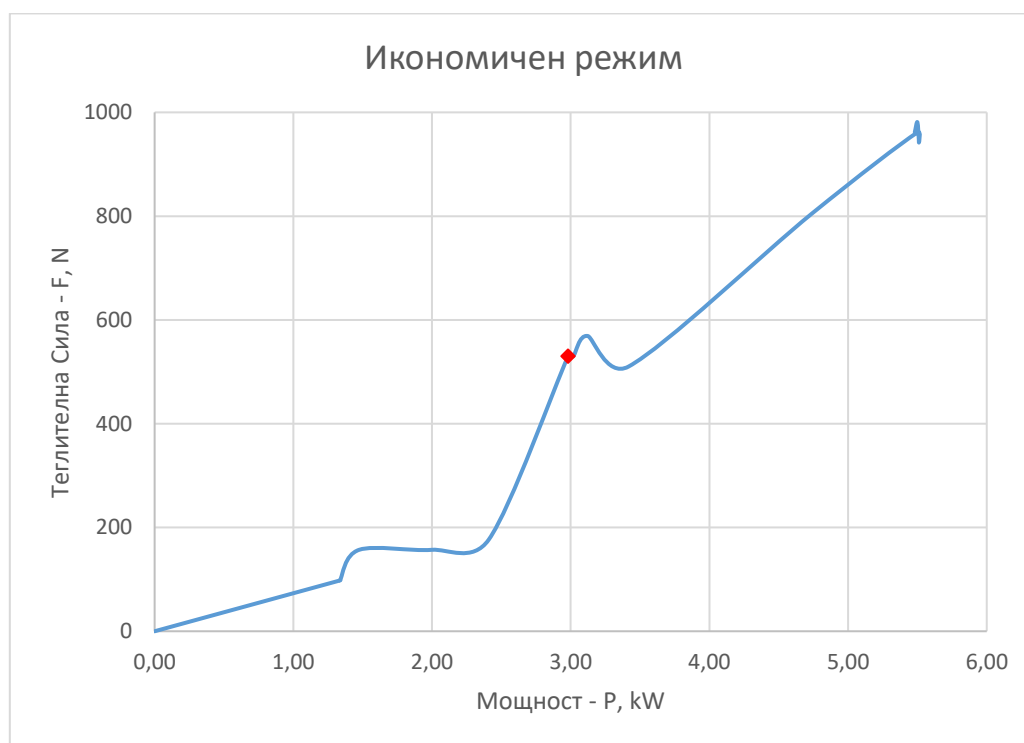
Фиг. 7. Отношение на консумираната мощност и скоростта на плавателния съд от скоростта на въртене на електродвигателите при работа в Нормален режим

На Фиг. 7 са представени обобщените данни от изследването на работата на електродвигателите в Нормален режим. И в този режим двата оперират в почти пълен синхрон, а работата им се характеризира с пик на мощността от 6,29kW при 1695min⁻¹. Това е така, заради ограничението на допустимата мощност до 60% в този режим. Скоростта, която достига плавателният съд при тази мощност е 2,51m/s. Оптималната ефективност се постига при 1040min⁻¹, където се пресичат правата на скоростта и кривите на мощността на електродвигателите, скоростта там е 1,54m/s за мощност 1,81kW. За всички изследвани скорости на въртене температурата на моторите варира между 17 и 28°C, а тази на контролерите от 12 до 20°C. Работното напрежение и за двата се изменя от 47,1 до 51,8V, а големината на тока, която е и определяща за разхода на електроенергия - от 0 до 133,5A.



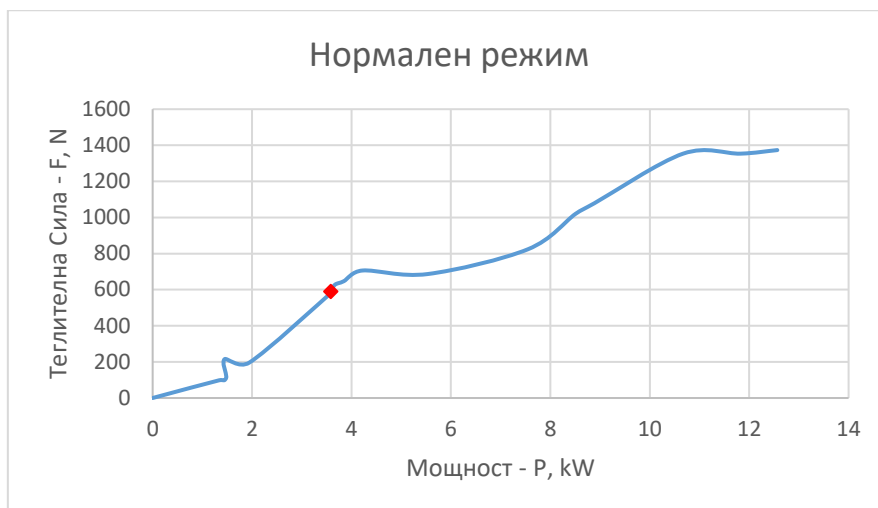
Фиг. 8. Отношение на консумираната мощност и скоростта на плавателния съд от скоростта на въртене на електродвигателите при работа в Спортен режим

На Фиг. 8 са представени обобщените данни от изследването на работата на електродвигателите в Спортен режим. Двата оперират в почти пълен синхрон, а максималната им мощност достига $10,73\text{kW}$ при 2425min^{-1} . Скоростта, която развива плвателният съд при тази мощност е $3,60\text{m/s}$. За разликата от другите два режима, при спортния с увеличаването на скоростта на въртене мощността не нараства толкова равномерно. Бележи пикове от $2,79\text{kW}$ при 1120min^{-1} , $7,28\text{kW}$ при 1660min^{-1} и $8,69\text{kW}$ при 1895min^{-1} . Оптималната ефективност се постига при 1010min^{-1} , където се пресичат правата на скоростта и кривите на мощността на електродвигателите, скоростта там е $1,50\text{m/s}$ за мощност от $1,52\text{kW}$. За всички изследвани скорости на въртене температурата на моторите варира между 18 и 75°C , а тази на контролерите от 12 до 20°C . Работното напрежение и за двата се изменя от $47,1$ до $51,8\text{V}$, а големината на тока, която е и определяща за разхода на електроенергия - от 0 до 223 A .



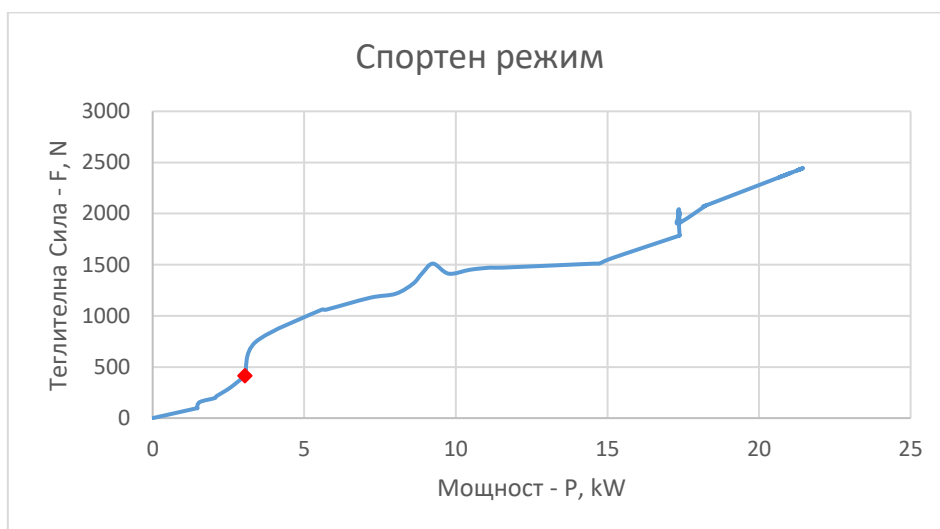
Фиг. 9. Мощностно-теглителна характеристика на плвателния съд при работа в Икономичен режим

На Фиг. 9 е представено отношението на теглителната сила на плвателния съд към мощността на електродвигателите при работа в Икономичен режим. При този режим максималната теглителна сила от 981N за двата двигателя се достига при мощност $5,5\text{kW}$ ($2,75\text{kW}$ за всеки). При достигане на максимална мощност ($2,76\text{kW}$ за електродвигател) теглителната сила намалява с 40N . Пик от 569N се наблюдава при мощност $3,12\text{kW}$ ($1,56\text{kW}$ за всеки електродвигател), което почти съвпада с момента на оптимална ефективност за този режим на работа.



Фиг. 10. Мощностно-теглителна характеристика на плавателния съд при работа в Нормален режим

На Фиг. 10 е представена зависимостта на теглителната сила на плавателния съд от мощността на електродвигателите при работа в Нормален режим. При този режим максималната теглителна сила от 1373N за двата двигателя се достига при мощност 12,57kW (6,28kW за всеки). Резултат от 1354N се достига при мощности 10,67kW и 11,83kW мощности. Това показва, че плавателният съд е ефективен при работа с различни мощности, което му позволява да оптимизира разхода на електроенергия и съответно да увеличи обхвата си на плаване.



Фиг. 11. Мощностно-теглителна характеристика на плавателния съд при работа в Спортен режим

На Фиг. 11 е представена зависимостта на теглителната сила на плавателния съд от мощността на електродвигателите при работа в Спортен режим. При този режим максималната теглителна сила от 2444N за двата двигателя се достига при мощност 21,45kW (10,73kW за всеки). На кривата се отличават два пика – 1511N при 9,24kW (4,62kW за всеки) и 2001N при 17,34kW (8,67kW за всеки). Първият достига ~62% от максималната теглителна сила за 43% необходимата мощност, а вторият ~82% за 81% от мощността.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базата на проведените изследвания е установен разходът на електроенергия на плавателния съд HydRuForce и часовете работа с един заряд на батериите при различните

режими на работа на електродвигателите. В икономичен режим при максимална мощност – 6h 57min, при оптимална ефективност – 12h 52min. В нормален режим при максимална мощност – 3h 3min, при оптимална ефективност – 10h 36min. В спортен режим при максимална мощност – 1h 47min, при оптимална ефективност – 12h 37min.

При анализа на резултатите от изследванията е установено, че за месеците на експлоатация май, юни и септември фотоволтаичната инсталация може да генерира около 98 заряда на акумулаторите, а за април, юли и август около 131 заряда. От това следва, че количествата възобновяема енергия могат да осигурят движението на HydRuForce с максимална мощност за повече от 16 h в икономичен режим за целия период на експлоатация. В нормален режим това се равнява на повече от 13 h с максимална мощност. За месеците април, юли и август в спортен режим плавателният съд може да се движи с максимална мощност повече от 10 h, а за месеците май, юни и септември – до час по-малко. При оптимална ефективност в нормален режим се постигат повече от 20 h движение, а в икономичен и спортен режим над 22 h.

В резултат на проведените изследвания е установено, че максималната теглителна сила на плавателния съд в икономичен режим е 981N, а тази при оптимална работна ефективност - 530N. За нормален режим – 1373N максимална теглителна сила и 589N при оптимална работна ефективност. В спортен режим се постига 2444N максимална теглителна сила и 412N при оптимална работна ефективност. От резултатите следва, че при оптимална работна ефективност най-голяма теглителна сила се постига в Нормален режим. Това означава, че за разлика от конвенционалните задвижвания, захранвани от фосилни горива, работата на електродвигателите може да се прецизира спрямо конкретните условия за плаване и по този начин да се оптимизира разходът на енергия.

Резултатите от изследването показват, че нулевоемисионна самодостатъчност или непрекъснато опериране на плавателния съд HydRuForce не може да бъде постигната с настоящата конфигурация на енергийната система. Това обосновава надграждането на енергийната система с допълнителни мощности, например водородни горивни клетки.

REFERENCES

- European Commission, (2022). Photovoltaic Geographical Information System (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#api_5.2)
- European Union, 2020. (European Commission). Sustainable & Smart Mobility Strategy © ISBN: 978-92-76-27374-5 doi: 10.2775/82355 NA-06-20-172-EN-C
- International Maritime Organization (IMO), (2000). First IMO GHG Study 2000, London, UK, 2000. www.imo.org
- International Maritime Organization (IMO), (2009). Second IMO GHG Study 2009, London, UK, 2009. www.imo.org
- International Maritime Organization (IMO), (2014). Third IMO GHG Study 2014, London, UK, 2014. www.imo.org
- International Maritime Organization (IMO), (2020). Fourth IMO GHG Study 2020, London, UK, 2020. www.imo.org
- Royal Dutch Shell plc & Deloitte, (2020). Decarbonizing Shipping: All Hands on Deck, Energy Transitions Commission, 2018.
- Seongwan K., Hyeonmin J. & Jongsu K. (2020). Trend analysis of domestic and international regulations for electric propulsion system. DOI: <https://doi.org/10.1080/25725084.2020.1809949>
- Sofiev, M., Winebrake J. J., Johansson, L., Carr, E. W., Prank, M., Soares, J., Vira J., Kouznetsov R., Jalkanen J-P. & J. Corbett, J. J. (2018). Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs. Nature Communications volume 9, Article number: 406. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02774-9>
- Solargis s.r.o. (Solargis), (2023), Global Solar Atlas, (<https://globalsolaratlas.info/>)
- Zahedi, B. (2014). Shipboard DC Hybrid Power Systems, Bijan Zahedi. ISSN: 1503-8181