

FRI-20.21-2-SITSTL-13

INVESTIGATING THE APPLICATION OF A TOROIDAL PROPELLER IN VESSELS THROUGH FLUID DYNAMICS SIMULATION¹

Eng. Valeri Georgiev, PhD

Department of Transport,
“Angel Kanchev” University of Ruse
Tel.: +359 878 959709
E-mail: valerigeorgiev58@gmail.com

Eng. Mladen Kulev

Manager
Prof Consulting LTD
Phone: +359 893 851 544
E-mail: theprofm1@gmail.com

Eng. Nicolae Tanase, PhD

Department of Electromechanical Systems and Technologies
National Institute for R&D in Electrical Engineering ICPE-CA, Bucharest
Phone: +4021 346 82 97
E-mail: nicolae.tanase@icpe-ca.ro

Abstract: The toroidal propeller is an innovative technology that is emerging as a key factor in the transformation of vessel propulsion. The paper investigates the application of a toroidal propeller through fluid dynamics simulations in a laboratory setting. The results are aimed at creating an appropriate model to reduce energy consumption and harmful and greenhouse gas emissions from vessels.

Keywords: Toroidal propeller, Energy Effectiveness, Marine Transport, greenhouse gas emissions reduction, CFD Simulation

ВЪВЕДЕНИЕ

В световен мащаб основната част от търговските превози се пада на водния транспорт. По данни на Организацията за икономическо сътрудничество и развитие (OECD) – около 80% от обема, а според стойността над 70%, (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2019). От не по-малко значение е и превозът на пътници по вода.

По-голямата част от световния флот все още разчита на фосилни горива за задвижване (Tay, Z. Y. 2023). Дори това да се промени и плавателните съдове да бъдат преоборудвани със съвременни електрически системи за задвижване, общият разход на енергия не би намалал значително, тъй като принципната технология на задвижване - с конвенционални винтови витла не се е подобрила значително от изобретяването си в началото на XIX век. До 2020г., когато Грегъри Шароу представя т.нар. Витло Шароу (The Sharrow Propeller™), (Rudow, L. 2020). Изобретено е през 2012г. и представлява витло с тороидална форма на ножовете, която е вдъхновена от тази на плавниците на гърбатия кит (European Patent Office, 2018). През последните години витлата с тороидална форма придобиха по-голяма популярност и затова започна тяхното използване при някои плавателни съдове, (Sharrow Marine, 2023). Предимствата им в сравнение с конвенционалните витла и модификациите на основата на същите (Anderson P. 1997, Anevlavi D. et. al., 2023) са - по-малко вибрации, редуциране на шума, значително по-голяма обратна тяга, по-висока скорост, съответно

¹ Докладът е представен на научна сесия на 27 октомври 2023 в секция УИТСТЛ с оригинално заглавие на български език: ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРИЛОЖЕНИЕТО НА ТОРОИДАЛНО ВИТЛО В ПЛАВАТЕЛНИ СЪДОВЕ ЧРЕЗ СИМУЛАЦИИ НА ИЗЧИСЛИТЕЛНАТА ДИНАМИКА НА ФЛУИДИТЕ (CFD)

ефективност, при средни обороти и повишена управляемост (Blain, L., 2023). Затова в настоящия доклад е направено изследване за използването на такива витла при плавателните съдове за превоз на пътници, товари и за развлекателни цели.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Същност на тороидалните витла

Дизайнът на тороидалното витло се отклонява от конвенционалната аксиална конфигурация на витлото, като възприема геометрия на усукан неправилен торус. При конвенционалните витла от централната главина излизат лопатки с лека извивка. От своя страна извитите лопатки на тороидалните витла са подредени в широка кръгова верига, имитирайки въртящ се ореол (United States Patent and Trademark Office, 2019) и позволявайки оптимална динамика на флуида и тяга. Предимствата на този иновативен дизайн са - намаляване на съпротивлението, съответно подобряване на хидродинамичната ефективност, минимизиране на загубите на енергия причинени от кавитация и подобряване на тягата (Merlet, B., 2019). Тези предимства очертават тороидалните витла като обещаващо решение за различни морски приложения.

2. Моделиране на тороидални витла с различни диаметри и стъпка

За целите на изследването са моделирани 3 тороидални витла с еднакъв диаметър на основата и еднаква форма на ножовете. За всеки модел на витло е избран различен диаметър и ъгъл на атака. За проектирането е използвана програма SolidWorks Premium 2023. Моделът електродвигател, за който са проектирани е **EZ Outboard Sport 20HP**. Мощността на електродвигателя е $P=10,56 \text{ kW}$, максималният въртящ момент на витлото $n=2500 \text{ min}^{-1}$. Характеристиките на витлата са показани в Таблица 1, а самите витла на Фиг. 1 и Фиг. 2.

Таблица 1.

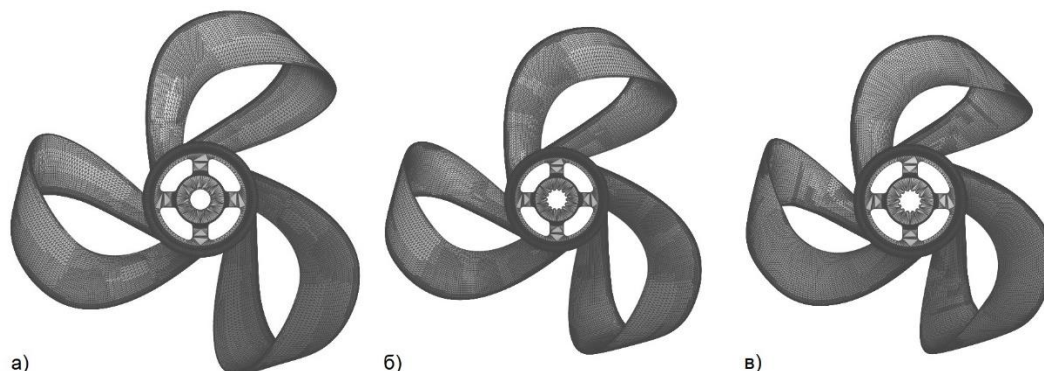
Основни характеристики на проектираните тороидални витла

Наименование	Витло №1	Витло №2	Витло №3
Диаметър на основата. mm	77,3	77,3	77,3
Дължина на основата. mm	114	114	114
Диаметър на витлото. mm	258,5	234,95	229,6
Стъпка. mm	416,56	177,04	183,56
Ъгъл на атака (°)	45	37	38
Максимална честота на въртене $n, \text{ min}^{-1}$	2500	2500	2500

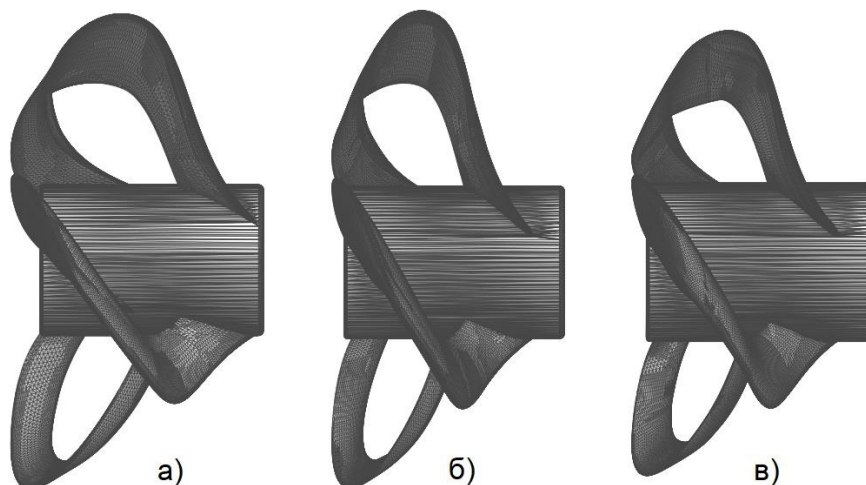
3. Изследване на динамичните характеристики на моделите чрез симулация на динамиката на флуидите

За да се идентифицират и приложат предимствата на сложната геометрия и да се оцени ефективността на тороидалните витла, трябва да се направят симулации на изчислителната динамика на флуидите (CFD). (Godge. S. et. al., 2020, Heydari. M. 2019). На база резултатите могат да се използват усъвършенствани числени техники за прецизиране на параметрите на дизайна и постигане на оптимална производителност. Параметри като кривина на острието, стъпка, съотношение на страните и други. Неизменно изискване за валидиране на теоретичните модели и оценка на хидродинамичните характеристики на тороидалните витла

при различни експлоатационни условия са експерименталните изследвания. Включително демонстрации в реални водни приложения.



Фиг. 1. Преден изглед на изследваните тороидални витла: а) Витло №1, б) Витло №2, в) Витло №3



Фиг. 2. Страничен изглед на изследваните тороидални витла: а) Витло №1, б) Витло №2, в) Витло №3

Гранични условия при симулацията:

Изградената изчислителна област около моделите на тороидално витло за числената 3D симулация на течението се състои от цилиндричен обем, представящ течението около витлото и друг вътрешен цилиндричен обем. Двата обема имат обща централна ос. Целта на вътрешния цилиндричен обем е да се ограничи областта на изчисляваното течение в близост до витлото, където то се ускорява и е възможно неговото смущение. Размерите на външния обем са:

- Дължина (Oz) – 1000 mm;
- Ширина (Ox) – 500 mm;
- Височина (Oy) – 500 mm.

Вътрешният обем е разположен съсно с изчислителната област с начало 300 mm от входа. Размерите му са съответно:

- За витло №1 – дължина – 130 mm, радиус – 387,8 mm;
- За витло №2 – дължина – 120 mm, радиус – 352,4 mm;
- За витло №3 – дължина – 120 mm, радиус – 344,4 mm.

Входящите параметри за симулацията:

- Флуид: Вода;
- Поток: турбулентен;
- Температура: 20°C;

- Налягане: 1 bar;
- Входна скорост на течението: 1,3m/s.

Изследвани скорости на въртене на витлата $n = 500; 1000; 1500; 2000; 2500 \text{ min}^{-1}$.

Изходящите параметри са:

- Въртящ момент, Nm;
- Повърхностно Налягане, bar;
- Сила на тяга, kN;
- Напрежение на срязване, МРа.

На база на тях са изчислени Ефективност и специфични тяга и въртящ момент за различните витла.

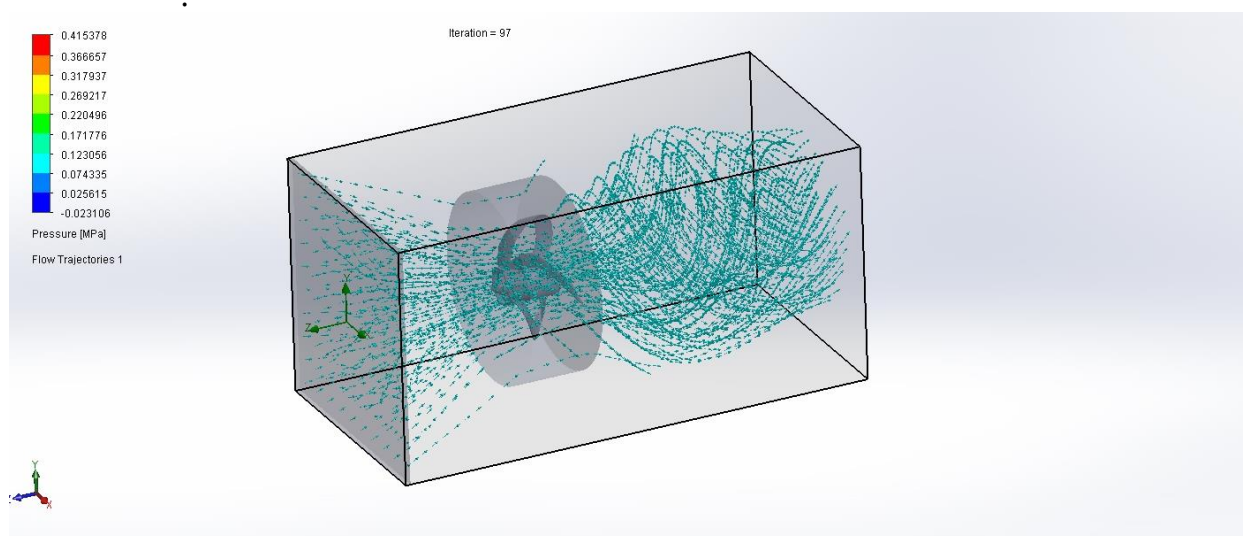
Специфичната тяга (T_c) е равна на силата на тягата (T) разделена на въртящия момент (Q), изразена чрез зависимостта

$$T_c = \frac{T}{Q} \cdot \left(\frac{N}{kNm} \right). \quad (1)$$

Специфичният въртящ момент (Q_c) е равен на въртящия момент (Q) разделен на силата на тягата (T), изразено чрез зависимостта

$$Q_c = \frac{Q}{T} \cdot \left(\frac{Nm}{kNm} \right). \quad (2)$$

На фиг. 3 е представено изображение от симулацията, а резултатите са представени в Табл. 2 и Табл. 3.



Фиг. 3. Симулация на Витло №1 при скорост на въртене $n = 1000 \text{ min}^{-1}$

От Таблица 2 може да се обобщи, че въпреки разликата в от почти 30 mm в диаметрите на витло №1 и витло №3 силата на тягата (kN) е една и съща за изследваните скорости на въртене. Това е обусловено от разликата в ъгъла на атака на двете витла. От тук можем да направим извода, че ъгълът на атака на витло №1 е прекалено голям и същата ефективност може да бъде постигната от витло с по-малък диаметър, но оптимален ъгъл на атака. За същите две витла с увеличаването на скоростта на въртене и въртящият момент (Nm) нараства в полза на това с по-голям диаметър. Витло №2 се характеризира с по-малка сила на тягата, но по-голям въртящ момент от другите два, което го прави най-подходящ за приложение в нискоскоростни плавателни съдове, опериращи в условия на ограничено пространство. Що се отнася до разхода на енергия витло №3 е с най-добри показатели като за същите нива тяга като витло №1 постига почти 3% по-малък разход на енергия.

Сила на тягата, въртящ момент и разход на енергия на изследваните витла при различни скорости на въртене

Скорост на въртене n , (min^{-1})	Витло №1			Витло №2			Витло №3		
	Сила на тяга F , (kN)	Въртящ момент τ , (Nm)	Разход на Енергия E , (kWh)	Сила на тяга F , (kN)	Въртящ момент τ , (Nm)	Разход на Енергия E , (kWh)	Сила на тяга F , (kN)	Въртящ момент τ , (Nm)	Разход на Енергия E , (kWh)
500	11,6	0,36	67,86	10,8	0,37	69,74	11,6	0,35	65,97
1000	23,2	0,72	271,43	21,6	0,74	278,97	23,2	0,7	263,89
1500	34,8	1,08	610,73	32,4	1,11	627,69	34,8	1,05	593,76
2000	46,4	1,44	1085,7	43,2	1,48	1115,9	46,4	1,40	1055,6
2500	58	1,8	1696,5	54	1,85	1743,6	58	1,75	1649,3

Както се вижда от таблица 3 витло №1 има най-високата специфична тяга, но най-ниския специфичен въртящ момент. Витло №2 има по-ниска специфична тяга от витло №1, но по-висок специфичен въртящ момент. Витло №3 има същата специфична тяга като витло №1, но по-нисък специфичен въртящ момент. Това означава, че витло №1 е най-доброто за приложения, където е необходима голяма сила на тяга с нисък въртящ момент. Например витло №1 би било подходящо за моторна лодка за риболов, която трябва да може да се ускорява бързо и да прави резки маневри. Витло №2 е по-добро за приложения, където е необходим баланс между сила на тяга и въртящ момент. Например, витло №2 би било подходящо за моторна лодка за круиз, която трябва да може да се движи с постоянна скорост и да маневрира лесно. Витло №3 е най-добро за приложения, където е необходима голяма сила на тягата с нисък въртящ момент. Например витло №3 би било подходящо за ледоразбивач, който трябва да може да пробие леда без той да залепва по него.

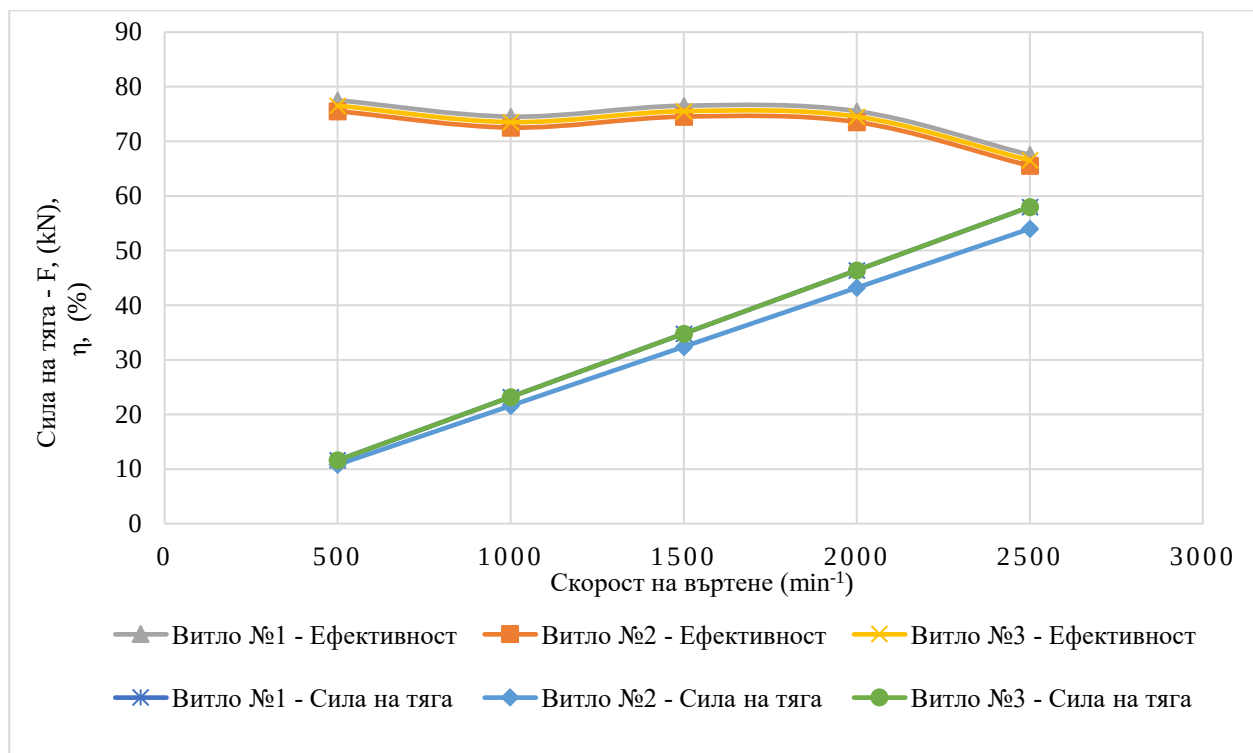
Таблица 3.

Специфична тяга и специфичен въртящ момент на изследваните витла

Наименование	Витло №1	Витло №2	Витло №3
Специфична тяга (N/kNm)	32,22	31,35	33,14
Специфичен въртящ момент (Nm/kNm)	0,031	0,032	0,03

На фиг. 4 са представени отношенията на силата на тягата и ефективността към скоростта на въртене на всяко витло.

От обобщените във фигура 4 данни могат да се направят следните наблюдения – изследваните витла имат еднаква крива на ефективност. Пиковата ефективност при всяко от тях се достига между 1300 и 1800 min^{-1} , а разликата между тях е 1%, с максимална такава 76,53% за витло №2 и минимална 74,53% за витло №1. Силата на тягата (kN) за витло №1 и витло №3 е еднаква за всички изследвани скорости на въртене и с увеличаването на скоростта на въртене нараства с по-голяма стъпка от тази на витло №2. Въпреки вариращите диаметри сходствата в резултатите са определени от разликите в ъгъла на атака на отделните витла.



Фиг. 4. Отношение на силата на тягата и ефективността към скоростта на въртене на всяко витло

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направените изследвания в диапазона от 500 до 2500 min^{-1} следва, че постигнатите нива на ефективност на тороидалните витла са в границите от 78% до 66%. Кривата на ефективност за всеки от изследваните модели варира в тесни граници въпреки специфичните им конструктивни параметри, което не е характерно за конвенционалните витла. Това показва, че конвенционалните и тороидалните витла могат да бъдат взаимозаменяеми.

Получените от изследванията резултати показват, че ефективността на изследваните витла намалява при скорости на въртене над 2000 min^{-1} . От това следва, че са неподходящи за интегриране във високоскоростни плавателни съдове като патрулни и състезателни лодки, както и такива с извънбордови мотори. Оптималната ефективност на витлата се постига и остава сравнително постоянна между 1500 и 1800 min^{-1} , което ги прави най-подходящи за приложение в плавателни съдове за вътрешни водни пътища (реки и езера), в буксири и в пристанищни кораби.

От всички направени резултати следва, че Витло №3 има най-малък разход на енергия със средно 9% спрямо останалите. То постига същата сила на тягата като витло №1 при 1% по-ниска ефективност и значително по-малък диаметър. Това го определя като най-подходящо за интегриране в електромотора **EZ Outboard Sport 20HP**.

REFERENCES

- Anderson, P. (1997). A Comparative Study of Conventional and Tip-Fin Propeller Performance. National Academy Press. Washington. D.C. pp. 930-945.
<https://doi.org/10.17226/5870>
- Anevlavi, D., Zafeiris, S., Papadakis, G., Belibassakis, K. (2023). Efficiency Enhancement of Marine Propellers via Reformation of Blade Tip-Rake Distribution.
<https://doi.org/10.3390/jmse11112179>
- Blain, L. (2023). Toroidal propellers: A noise-killing game changer in air and water.
<https://newatlas.com/aircraft/toroidal-quiet-propellers/>.

European Patent Office. (2018). Turbines and fans inspired by whales: Stephen Dewar. Philip Watts and Frank Fish named European Inventor Award 2018 finalists. <https://www.epo.org/en/news-events/press-centre/press-release/2018/452056>

Godge, S. C., Shet, S. P., Pandya, A. M., Amin, D. K. (2020). Performance Analysis and Enhancement of Marine Propeller. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181. DOI: <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS020020>

Heydari, M., & Sadat-Hosseini, H. (2019). Analysis of propeller wake field and vortical structures using k- ω SST Method. Ocean Eng. 204. 107247 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107247>

Merlet, B. (2019). Sharrow: Amazing propeller geometry to optimize performance <https://www.boatindustry.com/news/32122/sharrow-amazing-propeller-geometry-to-optimize-performance>

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2019). How are trade and environmental sustainability compatible?. <https://www.oecd.org/trade/topics/trade-and-the-environment/>

Rudow, L. (2020). Loop Propellers – Prop Innovation From Sharrow Marine. <https://www.bdoutdoors.com/boating/boat-accessories/loop-propellers-prop-innovation-sharrow-marine/>

Sharrow Marine. (2023). Performance Reports. <https://sharrowmarine.com/blogs/performance-reports>

Tay, Z. Y., Konovessis, D. (2023) Sustainable energy propulsion system for sea transport to achieve United Nations sustainable development goals: a review. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-023-00132-y>

United States Patent and Trademark Office. (2019). United States Patent Application Publication Pub. No.: US 2019 / 0135410 A1. Sebastian et al. Pub. Date: May 9, 2019