

Висновок. Заслуги професора Єгорова Геннадія Вячеславовича перед суднобудівною та судноплавною галузями неможливо перелічити. Він був Всім.

Professor Egorov Gennady: Era-Man

Egorov Alexander

Marine Engineering Bureau, Odessa, Ukraine

Abstract. The main scientific and technical results of the activities of Professor, Doctor of Technical Sciences Egorov Gennady are determined. His influence on river, river-sea and sea fleet has shown. Main scientific achievements are described.

Keywords: Gennady Egorov; heritage; design; science; social activity.

УДК 621.314.58

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ІНДУКЦІЙНА ЗАРЯДКА СУДНОВИХ ТЯГОВИХ БАТАРЕЙ

Павлов Г.В.¹, Обрубов А.В.², Вінниченко І.І.³

*¹ доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна
pavlov.gv.nuk@gmail.com,*

*² кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна
andrii.obrubov@nuos.edu.ua,*

*³ кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна
i.i.vinnychenko@gmail.com*

Анотація. Запропоновано підвищення енергоефективності індукційної зарядки суднових тягових батарей за рахунок використання в системах зарядки резонансного перетворювача з широтно-частотним регулюванням для зменшення впливу нестабільності напруг мережі та буферних накопичувачів електроенергії, а також варіацій відстані між котушками і їх неспіввідносності. Наведено експериментальні осцилограми електромагнітних процесів.

Ключові слова: індукційна зарядка, безконтактна передача електроенергії, резонансні перетворювачі електроенергії, широтно-частотне регулювання.

За останні десять років кількість суден на тягових батареях зросла практично з нуля до сотень по всьому світу. Повністю електричні судна на тягових батареях вже не є штучним товаром для приватних замовників. На електричний рух переводяться все більш великі судна, які здійснюють комерційні перевезення, що свідчить про економічну ефективність в певній ніші їх експлуатації.

Так згідно з даними компанії-оператора електричного парому «Ampere» (Норвегія), досвід його експлуатації з 2014 р. показав скорочення на 95% шкідливих викидів в атмосферу і зменшення на 80% експлуатаційних витрат [1]. На борту судна знаходиться батарея енергоемністю 800 кВт•год вагою 11 тонн, яка живить два електродвигуна. Паром використовує всього 150 кВт•год на відрізок в 6 км через фіорд, а вартість електрики для перевезення 360 пасажирів і 120 машин становить всього близько 6 \$ [1]. На тлі даних результатів уряд

Норвегії зобов'язав перевізників закуповувати тільки екологічно чисті повністю електричні паромі і компанія-виробник «Norled» отримала заказ на виготовлення ще 53 таких паромів [1].

У 2018 року на лінії вийшли Шведські повністю електричні паромі «Augoга» і «Tyscho Brahe» у яких енергоємність батарей становить вже понад 4 МВт•год. З 2019 почалася експлуатація паромів «Elektra» (2x530 кВт•год) і «Ellen» (4,3 МВт•год), які обслуговують морські лінії в Скандинавії.

Між річковими портами Китаю з 2017 року курсує повністю електричний саморозвантажувальний річковий суховантаж [2]. Судно призначене для перевезення 2 тис. тонн вугілля. На ньому встановлена батарея енергоємністю 2,4 МВт•год, а запас ходу складає всього 50 миль. Але цього достатньо, щоб зробити рейс з одного порту в інший. Під час вантажних операцій, що тривають 1-2 години, батарея встигає підзарядитися до необхідного рівня. І за витратами на електроенергію перевезення істотно вигідніше, ніж на традиційному вичопному паливі.

З 2021 року на річці Янцзи експлуатуються повністю електричні круїзні судна «Yangtze River Three Gorges 1» з батареєю енергоємністю 7,5 МВт•год, розраховане на 1300 пасажирів і «Junlyu» на 300 пасажирів з батареєю енергоємністю 3,5 МВт•год [2].

В кінці 2021 р. очікується запуск в експлуатацію контейнеровозу Yara Birkeland (Норвегія) з батареєю енергоємністю на 9 МВт•год для всіх двигунів, а також відразу два електричних контейнеровоза «Tesla ships» (Нідерланди), розрахованих на 280 стандартних контейнерів, які курсуватимуть між портами Амстердама, Антверпена та Роттердама [3].

У 2022 році суднобудівний завод Kawasaki Heavy Industries (Японія) спустить на воду перший в своєму класі танкер, який працює тільки на літій-іонних батареях [4]. Судно e5 буде належати компанії Asahi Tanker і буде займатися перевезенням дизельного палива для заправки інших вантажних суден в Токійській затоці. Танкер обладнають акумуляторами на 3,5 МВт•год. Це достатньо для руху судна протягом «багатьох годин», як сказано в прес-релізі.

Звичайно ж, сьогодні електричні судна не можуть конкурувати з дизельними або газотурбінними ані за обсягом вантажу, що перевозиться, ані за відстанями, які вони можуть пройти без додаткової заправки. Традиційні судна перетинають океани, не потребуючи додаткового палива, а електричні судна на одному заряді можуть пройти лише десятки миль або до ста миль максимум. Тому сьогодні електричні судна можуть експлуатуватися лише в прибережних районах з можливістю періодичної підзарядки батарей.

Проблема в обмеженій місткості батарей і їх ціною. Однак, головним чином, через бум електромобілів літій-іонні акумулятори за останні десять років стали дешевше майже в десять разів завдяки вдосконаленню технологій і збільшеним обсягам виробництва. Згідно з галузевим дослідженням консалтингової фірми BloombergNEF, середня вартість літій-іонного акумулятора в 2020 році впала до \$ 137 доларів за кВт•год (рис. 1) [5, 6]. При цьому ціни на літій-іонні батареї з 2010 року знизилися на 88% і подальше зниження цін на них, почне грати головну роль в зміні тенденцій в транспорті і генерації електрики.

З огляду на особливості експлуатації електричних суден, актуальною проблемою є швидка зарядка (підзарядка) їх тягових батарей під час стоянки судна, наприклад, при вантажних операціях. Успішна експлуатація суден на коротких маршрутах з нульовим викидом шкідливих речовин можлива при постійній підтримці необхідного запасу енергії в батареях. При цьому час, доступний для зарядки сильно обмежено, а кількість енергії, яка подається в акумулятор має бути достатньою для підтримки регулярної та безперервної роботи. Це має на увазі необхідність підзарядки великої потужності. Якщо берегові розподільні мережі мають обмежену пропускну здатність, може знадобитися берегове сховище енергії для передачі необхідної потужності під час зарядки з метою виключення перевантажень берегової мережі.

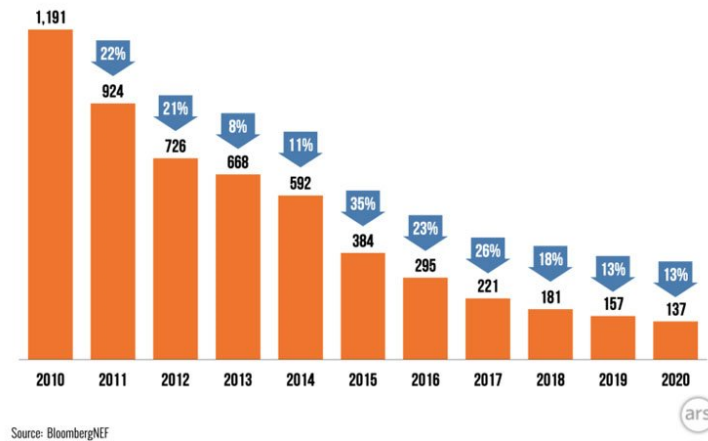


Рис. 1. Динаміка зниження середніх світових цін в доларах США на літій-іонні акумулятори. Джерело: BloombergNEF

З метою скорочення часу на підключення батарей до берегових мереж в судновій практиці часто, як і при експлуатації наземного транспорту використовується індукційна безконтактна підзарядка тягових батарей. Індукційна зарядка виключає механічний знос контактів при великих струмах і час, необхідний на кабельне підключення під час коротких стоянок, а також можливість струмів витoku і корозії в солоному середовищі, підвищує електробезпеку зарядки в умовах забруднень, льоду і снігу. При цьому забезпечується гальванічна розв'язка і безпека екстреного відключення батарей від берегової мережі в разі, коли судну терміново потрібно залишити причал.

Зарядний пристрій повинен забезпечувати доставку енергії в акумуляторні батареї в мегаваттному діапазоні потужностей або діапазоні сотень кіловатт. На відміну від наземних зазвичай нерухомих безконтактних зарядних пристроїв з широтним регулюванням резонансних перетворювачів, судові зарядні пристрої повинні забезпечити стійку ефективну роботу з урахуванням впливу хвиль, вітру, припливів і відливів, зміни осадки, крену, диференту під час вантажних операцій. Це означає, що система зарядки повинна мати високу стійкість до неспіввісності і варіаціям відстані від 20 см до 50 см в повітряному зазорі і має автоматично компенсувати ці впливи на процес зарядки батарей.

Структурна схема системи зарядки тягових батарей показана на рис. 2. Система передбачає як індукційну зарядку, так і контактну зарядку, яка здійснюється малим струмом під час тривалої стоянки судна найчастіше безпосередньо від мережі. Основними пристроями, що забезпечують індукційну зарядку, є берегова і суднова котушки індуктивності, як елементи резонансного контуру послідовно-резонансного перетворювача.

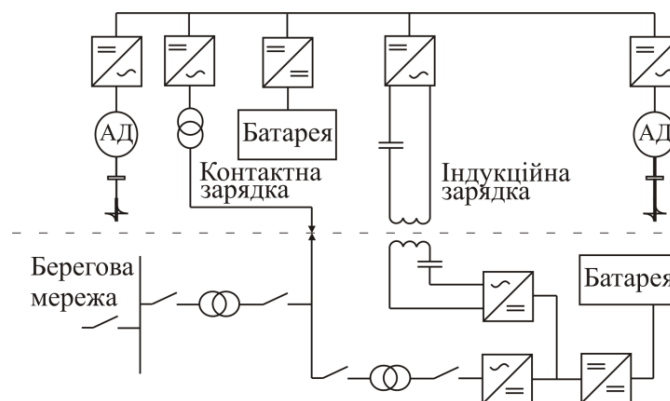


Рис. 2. Структурна схема системи зарядки тягових батарей.

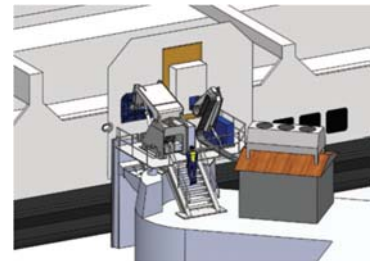
Котушки індуктивності в системах індукційної зарядки суднових тягових батарей забезпечують передачу потужності близько 500 кВт на квадратний метр площі котушок з ККД передачі енергії до 97%. Площа котушок може становити 2 і більше квадратних метрів. Типовий зовнішній вигляд суднової котушки індуктивності показано на прикладі парома «Amperе» (рис. 3.а,б) [7]. З огляду на те, що відстань між котушками і їх неспіввідношеність може змінюватися з огляду на перераховані вище фактори, що впливають на стан судна, еквівалентна ємність резонансного контуру може змінюватися, що буде призводити до зміни резонансної частоти. Постійний струм зарядки і постійне відношення комутаційної і резонансної частот забезпечується за рахунок частотного регулювання резонансного інвертора шляхом зміни комутаційної частоти в діапазоні 1-8 кГц. Таким чином, берегова котушка індуктивності буде залишатися в фіксованому положенні під час зарядки, а система керування перетворювачем буде підтримувати сталість переданої енергії в судову котушку індуктивності при будь-яких рухах судна в певних межах. Для поліпшення умов індукційної передачі енергії може використовуватися вакуумна система швартування [7], що дозволяє забезпечувати економію енергії за рахунок виключення частих запусків гребних двигунів (рис. 3.в).



а



б



в

Рис. 3. Паром «Amperе» (а), панель обмотки індуктивності парому (б), платформа вакуумної системи швартування Cavotec (зліва), система індукційної зарядки (праворуч) (в).

Більш високу ефективність передачі енергії в процесі зарядки можна домогтися за рахунок використання широтно-частотного регулювання в резонансному зарядному інверторі [8]. Як було сказано вище, періодична зміна положень котушок індуктивності суднової зарядної системи призводить до зниження зарядного струму. Зміна напруги живлення зарядного пристрою без авторегулювання також призводить до відхилень зарядного струму. Напруга може змінитися в результаті відхилень напруги мережі і розряду буферних накопичувачів електроенергії. Якщо ці обидва чинники – зміна положень котушок індуктивності і зміна напруги – діють згідно стосовно зарядного струму, то їх компенсація зажадає значної зміни частоти інвертора. Для звуження діапазону зміни робочої частоти інвертора (з метою обмеження частоти комутації транзисторів) і для ефективної компенсації змін напруги живлення доцільно поєднувати широтне і частотне регулювання. Широтне регулювання можна орієнтувати тільки на компенсацію змін напруги живлення, і воно буде в такому випадку здійснюватися за збуренням. Тоді частотне регулювання буде компенсувати тільки зміни параметрів резонансного контуру, а саме зміни співвідношень між індуктивностями розсіювання і взаємною індуктивністю індукторів, тобто буде здійснюватися за відхиленням. Для компенсації індуктивності розсіювання, що входить до резонансного контуру, необхідно підлаштовувати робочу частоту зарядного інвертора так, щоб ємнісний опір контуру і індуктивне опір розсіювання певним чином компенсувалися. Частота підлаштовується з урахуванням фазового зсуву між напругою інвертора і струмом контуру (або між напругою інвертора і напругою резонансної ємності). При зближенні робочої і резонансної частот інвертора буде зростати коефіцієнт передачі потужності в приймальну котушку індуктивності. При цьому робоча частота повинна залишатися вище резонансної частоти для включення транзисторів інвертора при близькому до нуля струмі.

На рис. 4 і рис. 5 показано осцилограми напруги зарядного інвертора (а) і напруги на резонансній ємності (б), яка пропорційна току контуру. Наведені осцилограми демонструють, що при зміні напруги і взаємної індуктивності індукторів зарядної системи амплітуда коливань напруги на ємності (рис.14, б і рис.15, б) підтримується на одному і тому ж рівні. Це досягається за рахунок компенсації зміни напруги живлення за допомогою широтного регулювання (відносна ширина імпульсів інвертора на рис. 4,а і рис. 5,а різні) і компенсації зміни індуктивності контуру за допомогою частотного регулювання.

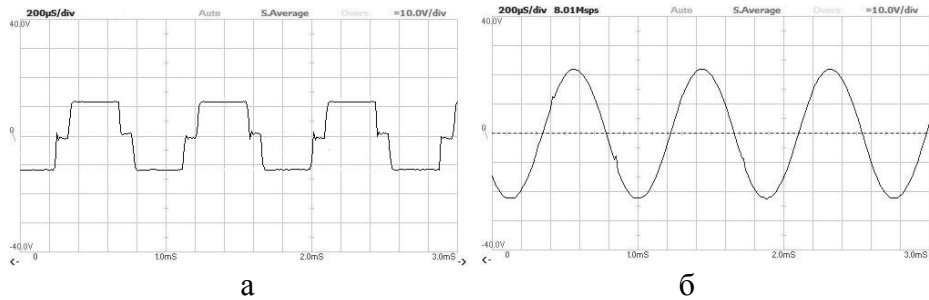


Рис.4. Осцилограми для напруги живлення 250В і робочої частоти 1170Гц

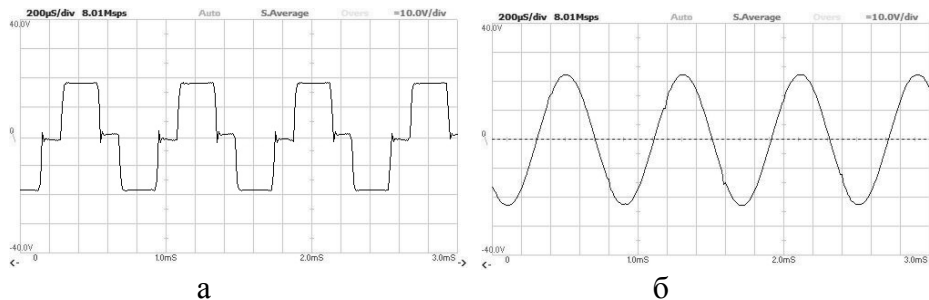


Рис.5. Осцилограми для напруги живлення 380В і робочої частоти 1250Гц

Наведені приклади показують масштабність на сьогодні проектів електричних суден, які необхідні для розробки технологій та інфраструктури, які в кінцевому підсумку можуть бути масштабовані для більших суден далекого плавання.

При індукційній зарядці суднових тягових батарей доцільно поєднання широтного і частотного регулювання інвертора, що забезпечить більш високу стабільність зарядного струму при коливаннях напруги мережі та берегової батареї та сприятливо позначиться на умовах роботи транзисторів інвертора і обмоток індуктивностей. Широтно-частотне регулювання також може вводиться як для регулювання зарядних струмів при тривалій зарядці на нічний стоянці, так і при прискореній зарядці на стоянці під час вантажних операцій судна.

Література

1. N. P. Reddy et al., "Zero-Emission Autonomous Ferries for Urban Water Transport: Cheaper, Cleaner Alternative to Bridges and Manned Vessels," in IEEE Electrification Magazine, vol. 7, no. 4, pp. 32-45, Dec. 2019, doi: 10.1109/MELE.2019.2943954.
2. Xiaoli Mao, Elise Georgeff, Dan Rutherford, and Liudmila Osipova, "Repowering Chinese coastal ferries with battery-electric technology: Operational profiles of Chinese coastal ferries, their energy demand, and the implied battery system assessment", ICCT working paper, vol. 21, 2021, pp. 1-17. <https://theicct.org/sites/default/files/publications/chinese-coastal-ferries-electric-apr2021.pdf>.
3. Paul Dean, Tom Walters, Jonathan Goulding, "Maritime autonomous surface ships", Holman Fenwick Willan LLP, 2017. <http://www.hfw.com/downloads/HFW-Maritime-Autonomous-Surface-Ships-July-2017.pdf>.

4. Gallucci M., "The first battery-powered tanker is coming to Tokyo", IEEE Spectrum, 2021. <https://spectrum.ieee.org/first-battery-powered-tanker-coming-to-tokyo>.
5. Veronika Henze, "BloombergNEF's annual battery price survey", 2020. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>.
6. Hall D., Lutsey N., "Effects of battery manufacturing on electric vehicle lifecycle emissions. ICCT briefing", 2018, 12 p.
7. G. Guidi, J. A. Suul, F. Jensen and I. Sørensen, "Wireless Charging for Ships: High-Power Inductive Charging for Battery Electric and Plug-In Hybrid Vessels," in IEEE Electrification Magazine, vol. 5, no. 3, pp. 22-32, Sept. 2017, doi: 10.1109/MELE.2017.2718829.
8. Павлов Г.В., Обрубов А.В., Нікітіна О.В., Покровський М.В. Перетворювачі постійної напруги на основі резонансних інверторів. Монографія. – Миколаїв: НУК, 2013. – 372 с.

Energy efficient induction charging ship traction batteries

Gennadii Pavlov, Andrey Obrubov, Iryna Vinnychenko

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. It is proposed to increase the energy efficiency of induction charging of marine traction batteries by using in charging systems resonant converter with latitude-frequency control to reduce the impact of instability of mains voltages and buffer storages, as well as variations in distance between coils and their misalignment. Experimental oscillograms of electromagnetic processes are given.

Keywords: induction charging, contactless power transmission, resonant power converters, width-frequency control.

УДК 629.5.12

КОМПЛЕКС МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ БУКСИРНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУДЕН ДЛЯ ЇХ ПРОХОДУ КАНАЛАМИ, ПІДХІДНИМИ КАНАЛАМИ, ПРИЧАЛЮВАННЯ ТА ВІДЧАЛЮВАННЯ В МОРСЬКИХ ПОРТАХ УКРАЇНИ ТА ЗОВНІШНІХ РЕЙДАХ ПОРТІВ В ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ НАВІГАЦІЙНИХ УМОВАХ, ЩО НЕ ОБМЕЖУЮТЬ АБО НЕ ЗАБОРОНЯЮТЬ ЦІ ОПЕРАЦІЇ

Нєкрасов В. О.

доктор технічних наук, професор

Завідувач кафедри теорії та проектування суден

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

м. Миколаїв, Україна

valery.nekrasov@nuos.edu.ua

Анотація: Дослідженням безпеки операцій буксирування транспортних суден визначено комплекс гідрометеорологічних навігаційних умов, що суттєво не обмежують або не забороняють такі операції. На цій основі створено комплекс методик визначення кількості і потужності буксирів, необхідних для здійснення безпечних ескортних операцій з судами, які відвідують морські порти в існуючих гідрометеорологічних навігаційних умовах, їх безпечного супроводу по судноплавним каналам і підхідним каналам морських портів, а також для безпечного супроводу і виконання кантовних і швартовних операцій в акваторіях морських портів України та їх зовнішніх рейдах. Дія комплексу методик поширюється на всі типи транспортних суден, самохідних та несамохідних, в діапазоні їх дедвейту від 500 до 230 000 тон.