

СЕКЦІЯ № 6. ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

УДК 621.314.58

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗКОНТАКТНОЇ ЗАРЯДКИ СУДНОВИХ ТЯГОВИХ БАТАРЕЙ ПРИ НЕСТАБІЛЬНІЙ ІНДУКЦІЙНІЙ ПЕРЕДАЧІ

Павлов Г.В.¹, Обрубов А.В.², Вінниченко І.Л.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, завідувач 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.l.vinnichenko@gmail.com,*

Анотація. Показана можливість оптимізації зарядного процесу суднових тягових батарей шляхом перестройки робочої частоти резонансних перетворювачів для забезпечення максимально можливої потужності заряджання при різних значеннях коефіцієнту магнітного зв'язку між котушками і еквівалентного опору навантаження. Отримано залежності коефіцієнту передачі напруги при різних фіксованих значеннях коефіцієнту магнітного зв'язку між котушками і різних фіксованих значеннях відносної робочої частоти.

Ключові слова: резонансні перетворювачі, суднові тягові батареї, безконтактна передача електроенергії, системи керування.

В останнє десятиліття почали успішно експлуатуватися електричні судна різного призначення на тягових батареях (пороми, танкери, суховантажі, круїзні та прогулянкові судна) [1-7]. Судна такого типу використовуються на коротких відстанях у прибережних районах. Досвід експлуатації суден на тягових батареях показав їхню економічну ефективність у поєднанні з високими екологічними характеристиками. Наприклад, згідно даних компанії-оператора порому «Ампер» (Норвегія) (рис. 1), скорочення шкідливих викидів в атмосферу досягає 95%, а зменшення експлуатаційних витрат - 80%. На борту судна знаходиться батарея 800 кВт*год вагою 11 тонн, яка живить два електродвигуна. Пором використовує всього 150 кВт*год на відрізок в 6 км через фіорд, а вартість електрики для перевезення 360 пасажирів і 120 машин становить близько 6 \$ [4-6]. На тлі даних результатів уряд Норвегії зобов'язав перевізників закуповувати лише екологічно чисті поромы, гібридні чи повністю електричні. В теперешній час успішно експлуатуються ще 23 поромы на Скандинавських лініях [1,5].



Рис. 1. Фото порому на тягових батареях «Ампер»

Типовий зарядний комплекс тягових батарей електричних суден передбачає індукційну і контактну зарядку (рис. 2). Контактна зарядка здійснюється малим струмом під час тривалої стоянки судна, найчастіше, безпосередньо від мережі. З огляду на особливості умов експлуатації суден на тягових батареях (частота та коротка тривалість стоянок), для заряду батарей часто використовують системи безконтактної зарядки. Якщо берегові розподільні мережі мають обмежену потужність, використовують берегове сховище енергії.

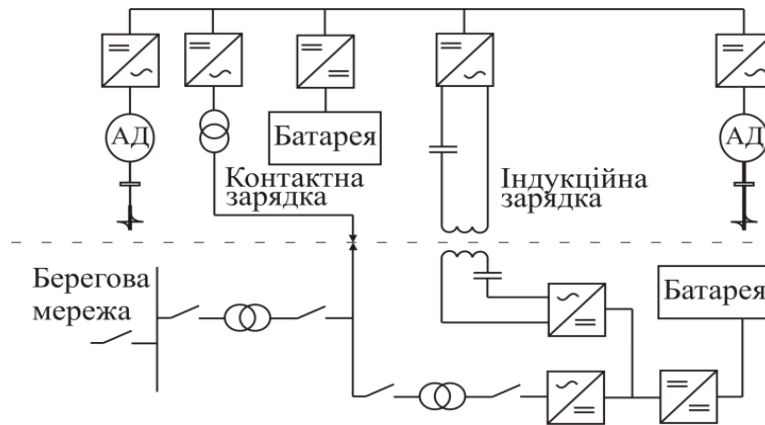


Рис. 2. Структурна схема системи заряду тягових батарей

Основними пристроями, що забезпечують індукційну зарядку, є берегові і суднові індуктори, що містять котушки індуктивності, як елементи резонансного контуру інвертора (рис. 3). Індуктори в системах індукційної зарядки суднових тягових батарей забезпечують передачу потужності близько 500 кВт на квадратний метр площі індукторів з ККД передачі енергії до 97% [4-6]. Площа індукторів може становити 1,5 і більше квадратних метрів.



Рис. 3. Фото комплексу індукційного заряду парому «Ампер»

Висока ефективність передачі енергії досягається при найбільш оптимальних умовах роботи системи, коли збігаються проекції приймального та передавального індукторів, а відстань між ними не перевищує 10-12 см (рис. 4,а). Однак вплив таких випадкових факторів як вітер, хвилі, припливи-відливи, зміна крену та диференту судна при вантажних операціях може призводити до збільшення відстані між приймаючим та передавальним індукторами, а також суттєвої розбіжності їх проекцій (рис. 4,б). Ефективність передачі енергії при цьому може істотно знижуватися.

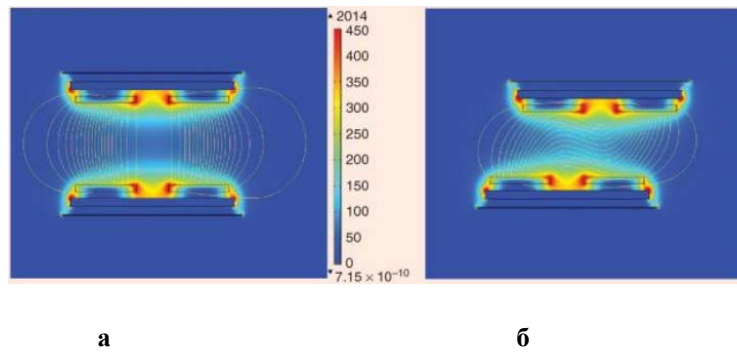


Рис. 4. Приймальний та передавальний індуктори системи заряду тягових батарей в умовах відсутності (а) та дії впливу збуджуючих факторів (б)

В системах безконтактної заряду тягових батарей постійна напруга берегових батарей або випрямлена напруга берегової мережі перетворюється у височастотну напругу за допомогою резонансного перетворювача (РП) з широтним керуванням [8, 9]. Наведена до еквівалентної схеми перших гармонік силова схема перетворювача з LLC-резонансним контуром, показана на рис. 5.

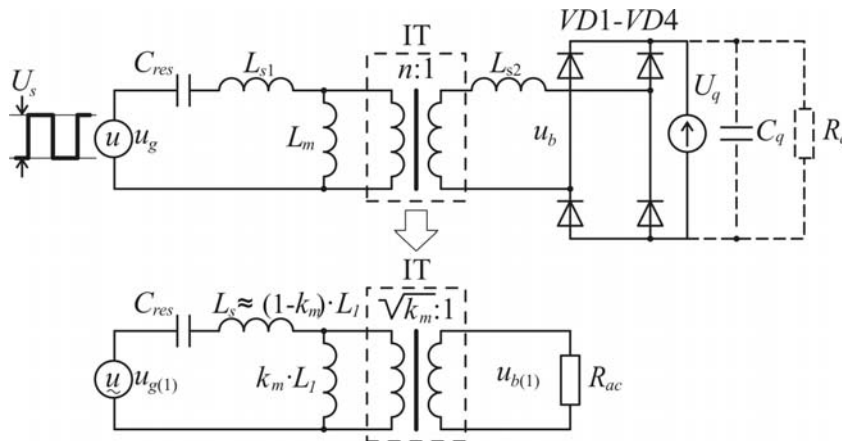


Рис. 5. Приведення силової схеми ЗРП до еквівалентної схеми для перших гармонік коливань: ІТ – ідеальний трансформатор

Силовая схема РП на рис. 5 може бути приведена до простішої еквівалентної схеми заміщення на змінному струмі за допомогою наступних перетворень: $L_s = L_{s1} + (L_m \cdot L_{s2} \cdot n^2) / (L_m + L_{s2} \cdot n^2)$; $L_l = L_s + L_m$; $L_s \approx L_l(1 - k_m)$; $L_m \approx L_l \cdot k_m$, де $k_m = M / \sqrt{L_1 \cdot L_2} = 0 \dots 1$ – коефіцієнт магнітного зв'язку, M – взаємна індуктивність, L_1 і L_2 – індуктивності передавальної і приймальної котушок. Випрямляч з акумуляторною батареєю заміщується деяким опором $R_{ac} = 8 \cdot n^2 \cdot R_q \cdot k_m / \pi^2$, який слугує еквівалентним навантаженням резонансного ланцюга на вторинній стороні для першої гармоніки змінного струму.

Прийняті вище припущення для схеми РП на рис. 5 дозволяють використати вираз для коефіцієнту передачі напруги LLC- резонансного перетворювача відносно першої гармоніки коливань:

$$K_U(R_q^*, k_m, \omega_g^*) = \left| \frac{\omega_g^{*2} \cdot \sqrt{k_m}}{(\omega_g^{*2} - 1) + j \cdot \omega_g^* \cdot (\omega_g^{*2} \cdot (1 - k_m) - 1) \cdot (1/R_q^*) \cdot (\pi^2/8)} \right|,$$

де $R_q^* = R_q \cdot n^2 / \sqrt{L_1 / C_{res}}$ – відносний еквівалентний опір навантаження для змінного струму; $\omega_g^* = \omega_g / \omega_{res}$ – відносна робоча частота; $\omega_{res} = 1 / \sqrt{L_1 \cdot C_{res}}$ – резонансна частота первинного контуру; $\omega_g / \omega_0 = (1 - k_m) \cdot (\omega_g / \omega_{res}) = (1 - k_m) \cdot \omega_g^*$ – приведення до відносної робочої частоти; ω_g – робоча частота комутації РП; $\omega_0 = 1 / \sqrt{L_s \cdot C_{res}}$ – резонансна частота послідовного ланцюга.

Розраховані залежності коефіцієнту передачі напруги РП з еквівалентним активним навантаженням демонструють можливості оптимізації робочої частоти РП для забезпечення максимальної потужності. Залежності на рис. 6 демонструють вплив зміни коефіцієнту магнітного зв'язку між котушками РП при фіксованих робочих частотах. По графіках видно, що при зміні коефіцієнту k_m в результаті зведення-розведення котушок індукторів в діапазоні 0.1-0.95 коефіцієнт передачі напруги K_U змінюється в декілька разів.

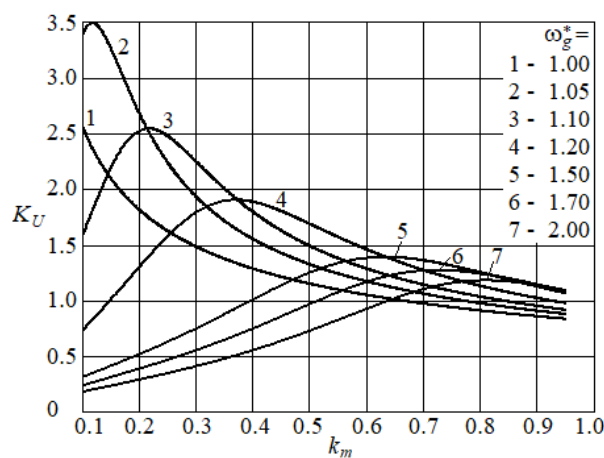


Рис. 6. Залежності коефіцієнту передачі напруги від коефіцієнту магнітного зв'язку між передавальною і приймальною котушками при різних фіксованих значеннях відносної робочої частоти і при $R_q^* = 1$

Сімейства залежностей коефіцієнту передачі напруги РП від відносної робочої частоти на рис. 7,а для малого значення відносного опору навантаження $R_q^* = 0.5$ дозволяють визначити окремі точки залежності робочої частоти для фіксованих значень коефіцієнту магнітного зв'язку між котушками на максимумах характеристик, які представлені в табл.1.

На рис. 7,б показана залежність відносної робочої частоти від коефіцієнту магнітного зв'язку між котушками, яка забезпечує максимальний коефіцієнт передачі по напрузі РП для малих значень відносного еквівалентного опору навантаження. Залежність визначалася на основі розрахунків залежностей на рис. 7,а для різних значень k_m . Припускається, що в реальному РП малий еквівалентний опір навантаження силової схеми ($R_q^* < 1$) відповідатиме розрядженій акумуляторній батареї, а великий опір ($R_q^* \geq 1$) – зарядженій акумуляторній батареї. Для практичного діапазону $k_m = 0.5 \dots 0.95$ кратність зміни робочої частоти при відносному опорі навантаження $R_q^* = 0.5$ складає приблизно 2,3 рази.

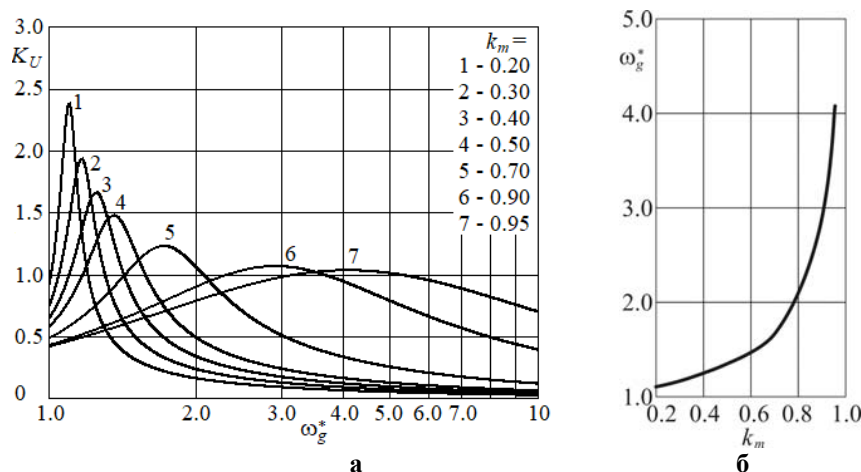


Рис. 7. Залежність коефіцієнту передачі напруги при різних фіксованих значеннях коефіцієнту магнітного зв'язку між котушками і при $R_q^* = 0.5$ від відносної робочої частоти (а) і залежність відносної робочої частоти (б) від коефіцієнту магнітного зв'язку між передавальною і приймальною котушками

Таблиця 1. Значення відносної робочої частоти в залежності від коефіцієнту магнітного зв'язку при максимальному коефіцієнті передачі напруги РП

k_m	0.20	0.30	0.40	0.50	0.70	0.90	0.95
ω_g^*	1.110	1.170	1.250	1.355	1.660	2.95	4.1

Подальші дослідження залежностей струму від напруги навантаження (зовнішні характеристики РП) доцільно проводити для навантаження у вигляді ЕРС на виході випрямляча. Для різних значень напруг акумуляторної батареї, крайні значення котрих, починаючи від розрядженого і до зарядженого стану, відрізняються приблизно в 1,5-1,7 рази, можливо визначити сімейство залежностей, подібних графіку на рис. 7,б, які будуть використані в системі керування для створення закону зміни робочої частоти РП.

Висновки

В результаті даного дослідження показана принципова можливість реалізації ідеї оптимізації зарядного процесу шляхом перестройки робочої частоти РП для забезпечення максимально можливої потужності заряджання акумуляторної батареї при різних значеннях коефіцієнту магнітного зв'язку між котушками і еквівалентного опору навантаження.

Для уточнення закону примусової зміни робочої частоти з точки зору ефективності процесу заряджання і забезпечення прийнятного ККД при змінах магнітного зв'язку між котушками в результаті можливих зміщень доцільно додатково дослідити залежності ККД системи з врахуванням типових активних втрат (комутаційних, резистивних і втрат на перемагнічування) теоретичним і експериментальними шляхами.

Література

1. Kolodziejski, M.; Michalska-Pozoga, I. Battery Energy Storage Systems in Ships' Hybrid/Electric Propulsion Systems. *Energies* 2023, 16, 1122. <https://doi.org/10.3390/en16031122>
2. Corvus Energy awarded battery for the world's first zero-emission tanker project. <https://corvusenergy.com/corvus-energy-awarded-battery-for-the-worlds-first-zero-emission-tanker-project/>
3. Tran, V.-K.; Paul, S.; Lee, J.-W.; Choi, J.-H.; Han, P.-W.; Chun, Y.-D. System-Level Consideration and Multiphysics Design of Propulsion Motor for Fully Electrified Battery Powered Car Ferry Propulsion System. *Electronics* 2023, 12, 1491. <https://doi.org/10.3390/electronics12061491>
4. Ampere Electric-Powered Ferry. <https://www.ship-technology.com/projects/norled-zero-cat-electric-powered-ferry/>

5. Bjarte Hoff. Electric ships in Norway. Experiences and Future Trends. <https://munin.uit.no/bitstream/handle/10037/20281/article.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
6. World's First All-Electric Battery-Powered Ferry <https://cleantechnica.com/2015/06/13/worlds-first-electric-battery-powered-ferry/>
7. Yara Birkeland. Available online: <https://www.offshore-energy.biz/yara-birkeland-worlds-1st-fully-electric-boxship-prepares-for-commercial-ops/> (accessed on 12 November 2022).
8. Designing an LLC Resonant Half-Bridge Power Converter [Електронний ресурс] // Texas Instruments Incorporated. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ti.com/seclit/ml/slup263/slup263.pdf>.
9. Understanding LLC Operation (Part II): What to Consider in LLC Converter Design [Електронний ресурс] // Monolithic Power Systems, Inc.. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.monolithicpower.com/understanding-llc-operation-part-ii-what-to-consider-in-llc-converter-design>.

Increasing the efficiency of non-contact charging of ships' traction batteries at unstable induction transmission

Gennadii Pavlov, Iryna Vinnychenko, Andrii Obrubov
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The possibility of optimizing the charging process of ship's traction batteries by adjusting the operating frequency of resonant converters to ensure the maximum possible charging power at different values of the magnetic coupling coefficient between the coils and the equivalent load resistance is shown. Dependencies of the voltage transfer coefficient at different fixed values of the magnetic coupling coefficient between the coils and different fixed values of the relative operating frequency were obtained.

Keywords: resonant converters, ship's traction batteries, contactless power transmission, control systems.

УДК 681.5

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ У ХВИЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Білюк І.С.

*кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова,
м. Миколаїв, Україна
ivanbilyuk@gmail.com*

Гаврилов С.О.

*кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова,
м. Миколаїв, Україна
sergey.gavrilov81@gmail.com*

Савченко О.В.

*викладач кафедри автоматики
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова,
м. Миколаїв, Україна
savchenko1984@gmail.com*

Без'язика А.О.

*аспірант кафедри автоматики
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова,
м. Миколаїв, Україна*