

3. Полінкевич, О. (2023). Інформаційно-комунікативні та логістичні технології організації обслуговування клієнтів готелю. Ресторанний і готельний консалтинг. Інновації, 6(2), 150–170. <https://doi.org/10.31866/2616-7468.6.2.2023.291697>
4. Січка І.І. Головні міжнародні логістичні компанії у сфері готельно-ресторанного бізнесу / Інфраструктура ринку: електронний науково-практичний журнал. Вип. 40, 2020. - С. 14-18.
5. Гуштан Т., Корсак Р. Роль логістики в забезпеченні сталого розвитку готельно-ресторанного бізнесу. Розвиток сучасної освіти і науки: результати, проблеми, перспективи. Том XVII: Подолання кризових ситуацій у науці та освіті / [Ред.: Я. Гжесяк, І. Зимомря, В. Ільницький]. Конін – Ужгород – Перемишль – Миколаїв: Посвіт, 2024. С. 218-220.

629.12.037

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.23

Тимощук О.М., Шапран Ю.Є.

ІМПУЛЬСНО-МОДУЛЯЦІЙНЕ УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Метою статті є дослідження застосовності імпульсно-модуляційного управління для судових електроенергетичних установок. Мета досягається шляхом застосування інноваційної бази силової електроніки. Імпульсно-модуляційне управління спрямоване на вирішення двох завдань: формування заданих параметрів енергії визначеної якості, з одного боку, і відтворення заданого відтворюючого входу, з іншого. Розвиток сучасних напівпровідникових приладів й зростання швидкодії мікропроцесорної техніки створили можливість застосування складних законів модуляції в системах з імпульсно-модуляційним перетворенням енергії в роботі, як загальносуднового обладнання, так і для забезпечення управління і руху судна. Управляемі перетворювачі для судових систем із ланкою постійного струму мають низький вплив завад на мережу живлення завдяки застосуванню багатоімпульсних схем випрямлення; використанню некерованих випрямлячів; наявності гальванічної розв'язки у вигляді ланки постійного струму; високому коефіцієнту корисної дії; сталості коефіцієнта потужності приводу в усьому діапазоні керування частотою обертання; підвищенню коефіцієнта потужності мережі за рахунок споживання виключно активного навантаження. Доведено, що з метою підвищення якості вихідної напруги у сучасних перетворювачах із ланкою постійного струму рекомендується використовувати трирівневі інвертори, які складніші за своєю конструкцією та алгоритмами керування, але мають низку переваг: вищий коефіцієнт корисної дії, ніж у дворівневих; менший рівень вищих гармонік у вихідній синусоїдальній напрузі; можливість скорочення розмірів або повної відсутності виділених фільтрів на виході трирівневого інвертора залежно від споживача; менша частота перемикання напівпровідникових ключів, що скорочують втрати під час перемикання.

Ключові слова: імпульсно-модуляційне управління, енергоефективність, морський транспорт, напівпровідникові прилади, силова електроніка, судові електроенергетичні установки, діагностування, ефективна потужність, передача потужності, судовий дизель, асинхронні судові двигуни, судно, судові двигуни.

Актуальність дослідження. На теперішній час інноваційний розвиток суспільства є одним з драйверів розвитку людства. Транспортні технології повинні відповідати двом критеріям: підвищенню екологічності та зменшенню енерговитрат. Оптимальне управління судовими електроенергетичними системами забезпечує виконання сформульованих критеріїв. Основним резервом підвищення енергоефективності судових енергетичних установок є застосування

інноваційної силової електроніки, заснованою на автономних інверторах напруги, перетворювачах напруги в ланцюзі електричної енергії: «генерування» → «перетворення» → «споживання».

Суднові електроенергетичні системи мають особливу потребу в оптимальному управлінні, пов'язану з автономністю застосування, обмеженістю простору для розміщення додаткових пристроїв управління, високою вартістю й обмеженістю ресурсів.

Особливо важливою вона є для таких автономних електроенергетичних систем як суднові, оскільки наявні ресурси на судні завжди обмежені, а режими роботи споживачів не завжди є оптимальними.

Підвищення ефективності роботи суднових електроенергетичних систем пов'язане з удосконаленням перетворювачів енергії (із застосуванням відповідної елементної бази) та з оптимізацією енерговитрат для споживачів на судні.

Необхідно відмітити той факт, що розвиток мікропроцесорної техніки та твердотільної електроніки, мініатюризація елементної бази дозволяє застосовувати складні закони модуляції в системах з імпульсно-модуляційним перетворенням енергії при модернізації суднових електроенергетичних установок, що дозволяє розв'язати протиріччя обмеженості ресурсу та простору на судні. Даний факт і визначає актуальність статті.

Аналіз останніх досліджень. На теперішній час відмічається значний інтерес до вирішення завдань управління судновими установками за допомогою імпульсного керування потоком електроенергії на високій частоті [3, 4, 10].

Цій проблемі присвячено теоретичні роботи зарубіжних і вітчизняних шкіл і авторів. Література, яка використана у даному дослідженні може бути розділена на ряд груп. До першої групи слід віднести роботи з суднових електроенергетичних установок [4, 5, 10], які використані для обґрунтування можливості використання відповідних регуляторів на водному транспорті. До другої групи джерел віднесемо роботи з моделювання та управління силовою електронікою [2, 6, 7, 8], які використані для побудови відповідних систем управління. Допоміжна група джерел [1, 9] використана для підтвердження зроблених у статті висновків.

Мета статті. Дослідження застосовності імпульсно-модуляційного управління для суднових електроенергетичних установок.

Основна частина. До складу електромеханічних систем сучасних суден входять різні технічні пристрої за своєю фізичною природою та принципом дії, робота яких передбачає споживання енергії різного виду й номіналу. Отже системи енергопостачання повинні мати у своєму складі перетворювальні пристрої, які забезпечують отримання енергії потрібного роду та якості. До сучасних суднових систем автоматики та обчислювальних комплексів висувається низка вимог, найважливіші з яких визначаються статичними, динамічними і масогабаритними показниками. Крім того, ці системи мають задовольняти вимогам електромагнітної сумісності (ЕМС) у межах єдиної автономної системи електроживлення судна. Сучасні системи, пристрої та технології вимагають від електропривода підвищеної точності руху, швидкодії, надійності, за мінімальних спотворень, що вносяться системою «перетворювач двигун» у мережеву напругу.

Проведемо класифікацію вторинних перетворювачів енергії, спираючись на їх завдання (рис. 1) [3].



Рисунок 1 – Класифікація вторинних перетворювачів енергії за завданням

Як правило, перетворювач енергії реалізує деяку комбінацію завдань, вимоги при цьому висуваються кінцевими споживачами енергії.

Основним чинником забезпечення щодо ефективності застосування інноваційної бази силової електроніки є можливість застосування імпульсно-модуляційного управління, спрямованого на вирішення двох завдань, зміст яких наведено на рис. 2 [6].



Рисунок 2 – Завдання імпульсно-модуляційного управління електроенергетичними судновими установками

Отже, вимоги до імпульсно-модуляційних перетворювачів (ІМП) є різними та передбачають використання як значної кількості типових перетворювальних пристроїв, так і застосування різних видів модуляції.

Зміна за певним законом тривалості або амплітуди імпульсів, які формуються з певною частотою є імпульсною модуляцією [7].

Під широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) розуміється імпульсне управління, за якого ширина або частота імпульсів модулюються в межах періоду основної частоти для створення певної форми кривої вихідної напруги.

Розвиток мікропроцесорної техніки дозволив широко застосовувати широтно-імпульсні перетворювачі (ШІП), що пояснюється низкою переваг:

- високий коефіцієнт корисної дії (ККД) (втрати потужності на регульовальному елементі ШІП незначні порівняно з втратами потужності при безперервному регулюванні);

- високий температурний діапазон роботи (регульовальним фактором є час провідності управляючого ключа, а не внутрішній опір регульовального елемента, що особливо важливо для суден);

- оперативність управління (відповідає швидкодії сучасної мікропроцесорної техніки, даний факт особливо важливий для автоматизованого управління електроприводом сучасних суден);

– гнучкість регулювання вихідної напруги в широкому діапазоні.

Застосування ШПП значно підвищується при проектуванні первинної мережі судна на постійному струмі, тобто без застосування випрямляча.

Як і для будь-якої технічної системи, ШПП притаманні й ряд недоліків:

– застосування імпульсного режиму роботи регулювального елемента є причиною встановлювання вхідних та вихідних фільтрів, що спричиняє інерційність процесів регулювання в замкнених системах;

– значні швидкості увімкнення та вимкнення струму в силовому ланцюзі ШПП призводить до виникнення завад, що впливає на ЕМС.

Однак, незважаючи на зазначені недоліки, застосування ШПП є перспективним в електроенергетичних установках сучасних суден, пов'язане з економічністю, малими габаритами, надійністю, малою чутливістю температурного діапазону, точністю регулювання та гнучкістю.

При проектуванні судових двигунів з'ясовано, що економічним способом регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму (ДПС) є зміна напруги, яка підводиться до якірного ланцюга.

З цією метою використовуються ланцюги «управляемий випрямляч» – «двигун постійного струму» (УВ-ДПС) та «широко-імпульсний перетворювач – двигун постійного струму» (ШПП-ДПС).

Погіршення коефіцієнта потужності як енергетичної характеристики у системі УВ-ДПС при малих навантаженнях й негативний вплив вищих гармонік на мережу вимагають до застосування на суднах саме системи ШПП-ДПС [6].

ШПП (рис. 3) у своєму складі містить некерований випрямляч (НВ). Таким чином, при живленні від мережі змінного струму коефіцієнт потужності наведеного приводу збільшується практично до одиниці. Крім того, підвищення частоти комутації у ШПП до 1-20 кГц (порівняно з величинами у 150-300 Гц) зменшує нерівномірність обертання судового двигуна, розширює діапазон регулювання та підвищує механічні характеристики замкнених систем електроприводу.

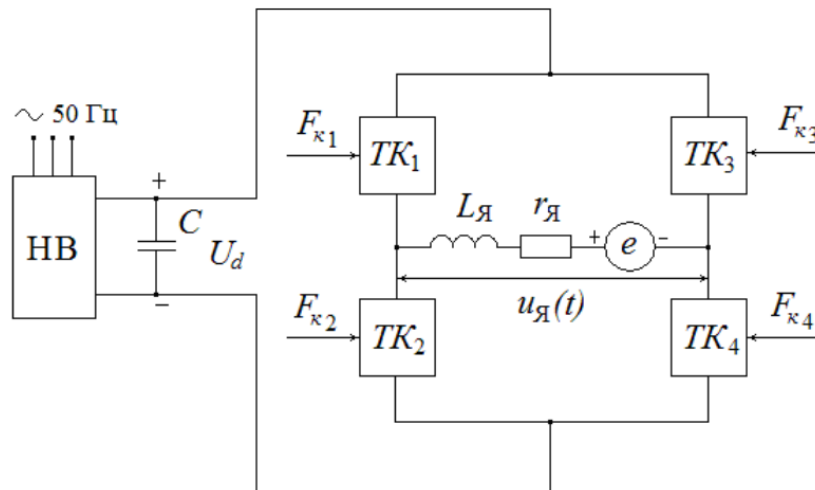
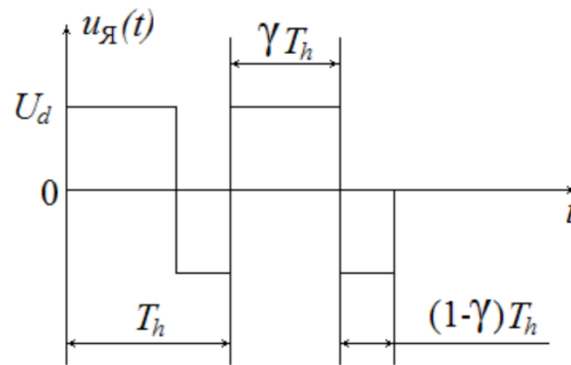
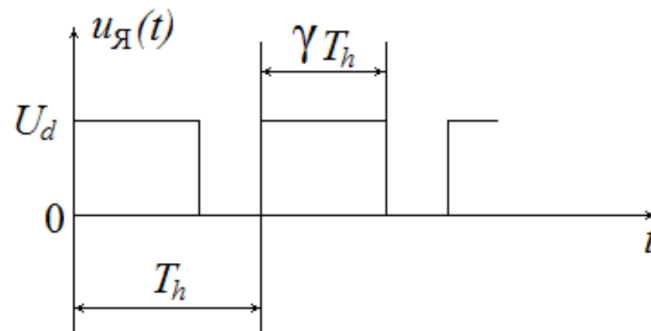


Рисунок 3 – Ланцюг «широко-імпульсний перетворювач» – «двигун постійного струму»

З метою управління електронними ключами при побудові ШПП можуть бути застосовані симетричний, несиметричний та почерговий режим перемикання, епюри яких наведено на рис. 4, 5.

Рисунок 4 – Еюра напруги на якорі $u_{\text{я}}(t)$ при симетричному управлінніРисунок 5 – Еюра напруги на якорі $u_{\text{я}}(t)$ при несиметричному та почерговому управлінні

Дослідження гармонік вихідної напруги $u_{\text{я}}(t)$, для даних режимів роботи (рис. 4, 5) на жаль детально у публікаціях не розглянуті.

На теперішній час прослідковується тенденція переходу від виконавчих елементів постійного струму до елементів змінного струму та застосуванні прямого мікропроцесорного управління силовими напівпровідниковими перетворювачами [6, 7].

Для асинхронних двигунів (АД), які набули значного поширення та споживають близько шістдесят відсотків вироблюваної енергії, використовують як скалярні, так і векторні методи управління [1]. Найрозповсюдженим способом реалізації частотного управління АД є використання перетворювачів частоти (ПЧ) з явною ланкою постійного струму [3, 7].

Можна розрізнити структури ПЧ з роздільним управлінням напругою та частотою, а також із ШІМ, що здійснюють одночасне регулювання як частоти, так і напруги. Регулювання напруги в структурах із роздільним управлінням здійснюється за допомогою перетворювачів змінного струму в постійний, виконаних на базі УВ або НВ та ШІП. Для управління двофазними АД можливо використати два однофазні АІН, під'єднані до обмоток управління та збудження, виконані за схемою мосту. З метою регулювання швидкості АДД можливо використати широтно-імпульсне регулювання (ШІР) та ШІМ на несучій частоті [3, 7].

Системи частотного управління АД забезпечують кругове електромагнітне поле в усьому діапазоні регулювання швидкості. Це забезпечує повне використання електродвигуна за потужністю, підвищує рівномірність обертання та збільшує його ККД.

Перетворювачі частоти для трифазних АД будуються на основі використання трифазних інверторів напруги та струму [6].

Висновок. Управляемі перетворювачі змінного струму в постійний будуються на основі використання УВ та ШІП. Управляемі перетворювачі для судових систем із ланкою постійного струму мають низку переваг:

- 1) Низький вплив завад на мережу живлення завдяки таким особливостям:
 - застосування багатоімпульсних схем випрямлення;
 - використання некерованих випрямлячів;

– наявність гальванічної розв'язки у вигляді ланки постійного струму (низька чутливість до перешкод зовнішньої мережі).

– високий ККД, понад 98,5%.

– сталість коефіцієнта потужності приводу в усьому діапазоні керування частотою обертання.

– підвищення коефіцієнта потужності мережі за рахунок споживання виключно активного навантаження.

З метою підвищення якості вихідної напруги у сучасних перетворювачах із ланкою постійного струму рекомендується використовувати трирівневі інвертори, які складніші за своєю конструкцією та алгоритмами керування, але мають низку переваг:

1) вищий ККД, ніж у дворівневих.

2) менший рівень вищих гармонік у вихідній синусоїдальній напрузі.

3) можливість скорочення розмірів або повної відсутності виділених фільтрів на виході трирівневого інвертора залежно від споживача.

4) для трирівневих інверторів потрібна менша частота перемикання напівпровідникових ключів, як наслідок скорочуються втрати під час перемикання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зайцев Г.Ф. та ін. Теорія автоматичного управління. /Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов, О.І. Бріцький: За ред. проф. Г.Ф. Зайцева. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.

2. Осовський, Д. І. Системи автоматичного управління судновими енергетичними установками [Текст] : навч. посіб. для вищ. навч. посіб. / Д. І. Осовський ; Держ. агентство риб. госп-ва України [та ін.]. - Київ : Ліра-К, 2014. - 274 с.

3. Регульований електропривод: Підручник / І.М. Голодний, Ю.М. Лаврінченко, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А.В. Торопов, О.В. Санченко; За ред. І.М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с.: іл.

4. Носенко В.М. Судовые энергетические установки / В.М. Носенко. – Николаев: ФЛН, 2013. – 443 с.

5. Артемов Г.А. Суднові енергетичні установки / Г.А. Артемов, В.М. Горбов. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – 356 с.

6. Доманський І. В. Основи енергоефективності електричних систем з тяговими навантаженнями: монографія / І. В. Доманський / НТУ «ХП». – Харків : вид-во ТОВ «Центр інформації транспорту України», 2016. – 224 с.

7. Переверзєв А.В., Василенко О.В. Моделювання елементів силової електроніки. Монографія. – Запоріжжя: ЗДІА. – 1998. – 117 с.

8. Krylov, D. S., & Kholod, O. I. (2023). Active rectifier with a fixed modulation frequency and a vector control system in the mode of bidirectional energy flow. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (6), 48–53.

9. Espinoza Jose R. *Inverters Power electronics: Handbook*. / Ed. H. Rashid Muhammad. USA: Academic Press, 2001.

10. Hengchun Mao, Fred C. Y. Lee, Dushan Borogevich and Silva Hiti. Review of High-Performance Three – Phase Power-Factor Correction Circuits. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. vol. 44, No 4, August, 2017, pp. 437- 446.

REFERENCES

1. Zaitsev H.F. Teoriia avtomatychnoho upravlinnia. /H.F. Zaitsev, V.K. Steklov, O.I. Britskyi: Za red. prof. H.F. Zaitseva. – K.: Tekhnika, 2002. – 688 p.
2. Osovskiy, D. I. Systemy avtomatychnoho upravlinnia sudnovymy enerhetychnymy ustanovkamy [Tekst] : navch. posib. dlia vyshch. navch. posib. / D. I. Osovskiy ; Derzh. ahentstvo ryb. hosp-va Ukrainy [ta in.]. - Kyiv : Lira-K, 2014. - 274 p.
3. Rehulovanyi elektropryvod: Pidruchnyk / I.M. Holodnyi, Yu.M. Lavrinenko, V.V. Kozyrskiy, L.S. Chervinskyi, D.A. Abduramanov, A.V. Toropov, O.V. Sanchenko; Za red. I.M. Holodnoho. – K.: TOV «TsP "Komprynt», 2015. – 509 p.
4. Nosenko V.M. Sudovye enerhetycheskye ustanovky / V.M. Nosenko. – Nykolaev: FLN, 2013. – 443p.
5. Artemov H.A. Sudnovi enerhetychni ustanovky / H.A. Artemov, V.M. Horbov. – Mykolaiv: UDMTU, 2002. – 356 p.
6. Domanskyi I. V. Osnovy enerhoefektyvnosti elektrychnykh system z tiahovymy navantazhenniamy: monohrafiia / I. V. Domanskyi / NTU «KhPI». – Kharkiv : vyd-vo TOV «Tsentri informatsii transportu Ukrainy», 2016. – 224 p.
7. Pereverziev A.V., Vasilenko O.V. Modeliuvannia elementiv sylovoi elektroniky. Monohrafiia. – Zaporizhzhia: ZDIA. – 1998. – 117 p.
8. Krylov, D. S., & Kholod, O. I. (2023). Active rectifier with a fixed modulation frequency and a vector control system in the mode of bidirectional energy flow. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (6), p. 48–53.
9. Espinoza Jose R. Inverters Power electronics: Handbook. / Ed. H. Rashid Muhammad. USA: Academic Press, 2001.
10. Hengchun Mao, Fred C. Y. Lee, Dushan Borogevich and Silva Hiti. Review of High-Performance Three – Phase Power-Factor Correction Circuits. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. vol. 44, No 4, August, 2017, p. 437- 446.

Tymoshchuk O., Shapran Y.

PULSE-MODULATION CONTROL OF SHIP POWER SYSTEMS

The aim of the article is to study the applicability of pulse-modulation control for shipboard electric power plants. The goal is achieved by using an innovative power electronics base. Pulse-modulation control is aimed at solving two problems: the formation of specified energy parameters of a certain quality, on the one hand, and the reproduction of a specified reproducing input, on the other. The development of modern semiconductor devices and the increase in the speed of microprocessor technology have made it possible to apply complex modulation laws in pulse-modulation energy conversion systems in the operation of both general shipboard equipment and ship control and propulsion. Controllable converters for ship systems with a DC link have a low impact of interference on the power supply network due to the use of multi-pulse rectification circuits; the use of uncontrolled rectifiers; the presence of galvanic isolation in the form of a DC link; high efficiency; constant drive power factor over the entire range of speed control; and an increase in the power factor of the network due to the consumption of only active load. It is proved that in order to improve the quality of the output voltage in modern converters with a DC link, it is recommended to use three-level inverters, which are more complex in their design and control algorithms, but have a number of advantages higher efficiency than that of two-level inverters; lower level of higher harmonics in the output sinusoidal voltage; possibility of reducing the size or complete absence of dedicated filters at the output of a three-level inverter depending on the consumer; lower switching frequency of semiconductor keys, which reduces switching losses.

Keywords: pulse modulation control, energy efficiency, maritime transport, semiconductor devices, power electronics, ship electrical power plants, diagnostics, effective power, power transmission, marine diesel, asynchronous marine engines, ship, marine engines.