

УДК 621.311:004
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/37>

Дакі О.А.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Якусевич Ю.Г.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Колесник В.В.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Тришин В.В.

Дунайський інститут водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

ІМПУЛЬСНО-МОДУЛЯЦІЙНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СУДНОВИХ СИСТЕМ

Розвиток сучасних напівпровідникових приладів і зростання швидкодії мікропроцесорної техніки створили можливість застосування складних законів модуляції у системах з імпульсно-модуляційним перетворенням енергії у роботі як усього суднового обладнання, так і для забезпечення управління рухом судна. Проблема підвищення техніко-економічних показників автономних суднових електроенергетичних систем має комплексний характер і пов'язана із підвищенням якісних характеристик як первинних, так і вторинних перетворювачів енергії у межах проєктів модернізації і створення нової техніки, а також із оптимізацією енерговитрат під конкретні типи споживачів електричної енергії різного функціонального призначення.

У статті розкрито основні процеси та побудовано схеми імпульсно-модуляційного регулювання електроенергетичних суднових систем. Досягнення потрібних техніко-економічних показників (економічність, надійність, якість виробленої енергії, електромагнітна сумісність, масогабаритні характеристики) таких вторинних перетворювачів енергії, як перетворювачі із ділянкою постійного струму, вимагає використання багаторазової комутації із різними методами модуляції разом із широтно-імпульсним регулюванням, а також східчастих принципів перетворення енергії.

Визначено, що для раціонального використання ресурсів управління у системі перетворювач частоти-асинхронний двигун, слід використовувати адаптивний підхід до вибору виду широтно-імпульсної модуляції залежно від частоти електромагнітного поля (ротора асинхронного двигуна), який полягає у переході від прямокутного закону управління автономним інвертором напруги у верхньому діапазоні частот електромагнітного поля до синусоїдального на підвищених частотах квантування у діапазоні низьких частот, здійснення котрих потребує використання мікропроцесорного управління і розроблення відповідного алгоритмічного забезпечення.

Для вирішення завдань динамічного синтезу імпульсних перетворювачів енергії практичний інтерес представляє розроблення алгоритмічних процедур синтезу з урахуванням квазівстановлених режимів без отримання усереднених моделей силової частини як об'єкта управління.

Ключові слова: електрообладнання, регулювання, судно, управління, широтно-імпульсний перетворювач.

Постановка проблеми. Досягнення необхідних техніко-економічних показників (економічність, надійність, якість виробленої енергії, електромагнітна сумісність, масогабаритні характеристики) таких вторинних перетворювачів енергії, як перетворювачі із ділянкою постійного струму, вимагає використання багаторазової комутації із різними методами модуляції разом із широтно-імпульсним регулюванням, а також східчастих принципів перетворення енергії. Тому під-

вищення якісних характеристик перетворювачів енергії із ділянкою постійного струму з багаторазовою комутацією і широтно-імпульсним регулюванням є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За цим напрямом були проведені дослідження і присвячені роботи таких закордонних і вітчизняних науковців, як Т.А. Глазенко, Б.Ф. Дмитрієв, Е. Джура, О.О. Єфімов, А.В. Кобзев, А.Є. Козярук, Б. Куо, А. Ланне, Ю.К. Розанов, Р.Т. Шрейнер та

інших. У роботах цих авторів представлено теоретичні основи дослідженої проблематики, проте не вирішено питання імпульсно-модуляційного регулювання електроенергетичних суднових систем.

Постановка завдання. Метою роботи є розкриття основних процесів та побудова схем імпульсно-модуляційного регулювання електроенергетичних суднових систем.

Виклад основного матеріалу дослідження. Ми розкриємо загальні принципи побудови, структури та формування елементної бази імпульсних перетворювачів енергії. Залежно від функціонального призначення споживачів і способів перетворення енергії вторинні перетворювачі вирішують такі завдання: трансформація, регулювання, стабілізація, випрямлення, інвертування, конвертування, перетворення частоти, перетворення кількості фаз, симетрування, компенсація фазових зрушень, перетворення джерела напруги у джерело струму, фільтрація та посилення звукової частоти.

Кожен функціонально-значимий блок здійснює зазвичай різні комбінації вищезазначених завдань. Вимоги до якісних показників вихідних координат функціонально-завершених блоків визначаються приймачами електричної енергії.

Головним фактором, який забезпечує ефективність використання сучасної елементної бази, є можливість застосування імпульсно-модуляційного управління, що вирішує такі дві основні задачі: формування заданого виходу і відтворення заданого управляючого входу, в основі яких лежать амплітудно- та широтно-імпульсні методи перетворення енергії [1, 2].

Вимоги до імпульсно-модуляційних перетворювачів завжди є різними, що допускає використання значної кількості типових перетворюючих пристроїв і видів модуляції.

В імпульсній техніці зміну за визначеним законом тривалості або амплітуди імпульсів, сформованих із визначеною частотою, прийнято називати імпульсною модуляцією [3].

Нині широкого застосування набувають широтно-імпульсні перетворювачі, які мають низку переваг:

- високий коефіцієнт корисної дії (ККД), оскільки втрати потужності на регулюючому елементі перетворювача є незначними порівняно із втратами потужності під час безперервного регулювання;

- мала чутливість до змін температури навколишнього середовища, оскільки регулюючим фактором є час провідності керуючого ключа, а не

внутрішній опір регулюючого елемента за безперервного регулювання;

- висока швидкодія, що особливо важливо для автоматизованого електропривода;

- гнучкість регулювання вихідної напруги у широкому діапазоні.

Роль широтно-імпульсних перетворювачів істотно зростає, коли первинна мережа виконується на постійному струмі, тобто відпадає необхідність у застосуванні випрямника струму.

Однак широтно-імпульсним перетворювачам властиві такі недоліки:

- імпульсний режим роботи регулюючого елемента призводить до необхідності встановлювати вхідні та вихідні фільтри, що зумовлює інерційність процесів регулювання у замкнутих системах;

- високі швидкості вмикання та вимикання струму в силовому ланцюзі широтно-імпульсного перетворювача, що призводить до виникнення радіоперешкод.

Незважаючи на зазначені недоліки, застосування широтно-імпульсних перетворювачів є досить перспективним у випадках, коли на перше місце висуваються такі вимоги, як висока економічність, надійність, малі габарити, мала чутливість до коливань температури, висока гнучкість і точність регулювання.

Найбільш економічним способом регулювання кутової швидкості двигуна постійного струму (ДПС) є зміна напруги, яка підводиться до якірного ланцюга. Із цією метою використовуються такі системи: керований випрямник – двигун постійного струму (КВ-ДПС) та широтно-імпульсний перетворювач – двигун постійного струму (ШП-ДПС).

Погіршення енергетичних характеристик системи КВ – ДПС за малих навантажень, особливо її коефіцієнта потужності, та негативний вплив вищих гармонік на мережу призвело до використання систем ШП – ДПС [4]. ШП (рис. 1) містить некерований випрямник (НВ), тому під час живлення від мережі змінного струму коефіцієнт потужності такого приводу збільшується практично до одиниці. Крім того, підвищення частоти комутації у ШП до $1\div 20$ кГц замість $150\div 300$ Гц дозволяє зменшити нерівномірність обертання двигуна, розширити діапазон регулювання і підвищити жорсткість механічних характеристик замкнутих систем електропривода.

Для управління електронними ключами у ШП використовуються симетричний, несиметричний і черговий режим переключення.

Аналіз гармонійного складу вихідної напруги $u_n(t)$ для режимів роботи виду (рис. 2) детально не розглянуто.

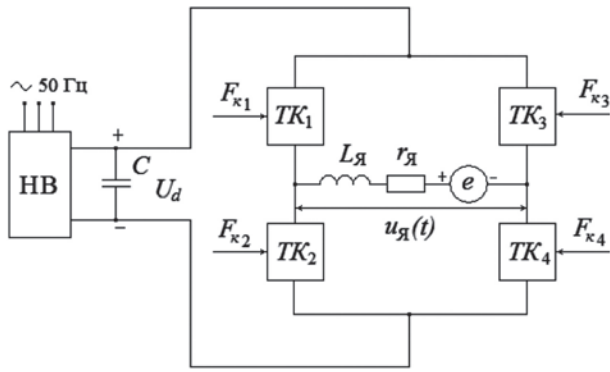


Рис. 1. Система ШПП - ДПС

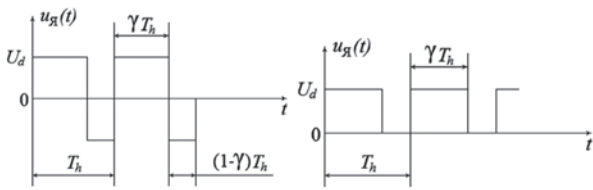


Рис. 2. Епюра $u_я(t)$. Структура перетворювачів частоти у системі частотного регулювання швидкості електропривода змінного струму:
а) за симетричного управління;
б) за несиметричного управління

Нині спостерігається стійка тенденція до переходу від виконавчих елементів постійного струму до виконавчих елементів змінного струму, а також до використання прямого мікропроцесорного управління силовими напівпровідниковими перетворювачами [5, 6].

Для асинхронних двигунів, які отримали найбільшого поширення і споживають близько 60% енергії, використовуються як скалярні, так і векторні методи управління [5]. Найпоширенішим способом здійснення частотного управління асинхронними двигунами є використання перетворювачів частоти (ПЧ) із чітко вираженою ланкою постійного струму [7].

Розрізняють структури ПЧ із роздільним управлінням напругою та частотою, а також із широтно-імпульсною модуляцією, що здійснюють одночасне регулювання частоти та напруги. Регулювання напруги у структурах з роздільним керуванням здійснюється за допомогою перетворювачів змінного струму у постійний, виконаних на базі КВ або НВ та ШПП. Для управління двофазними асинхронними двигунами (АДД) використовуються два однофазних автономних інвертори напруги (АІН), підключених до обмоток управління та виконаних за мостовою схемою (рис. 3). Для регулювання швидкості АДД використовуються широтно-імпульсне регулювання (ШІР) та широтно-імпульсна

модуляція (ШІМ) на несучій частоті [8]. Системи частотного управління АДД забезпечують кругове електромагнітне поле у всьому діапазоні регулювання швидкості, що дозволяє більш повно використати електродвигун за потужністю, підвищує рівномірність обертання і збільшує ККД.

ПЧ для трифазних асинхронних двигунів будуються на основі використання трифазних інверторів напруги і струму [8].

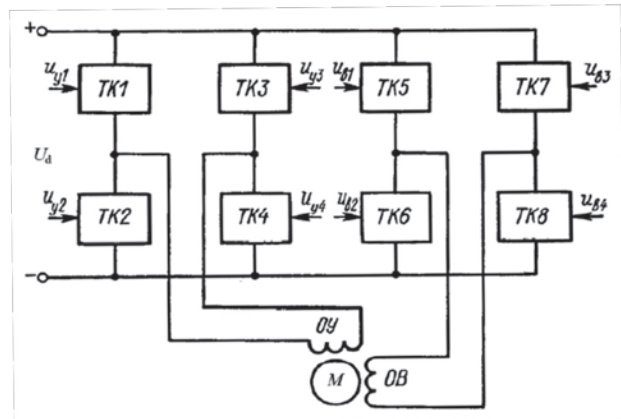


Рис. 3. Структура двофазного інвертора напруги для управління АДД

Структура ПЧ із ланкою постійного струму та КВ (рис. 4) реалізує базові алгоритми управління з \neq , $2\neq/3$ градусною провідністю, які характеризуються несинусоїдальністю характеру вихідного струму у статорних обмотках та пульсаціями моменту двигуна, що спричинює нерівномірність обертання двигуна, особливо на малих швидкостях.

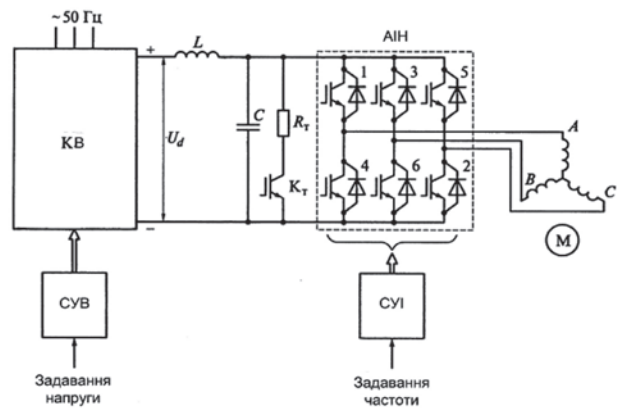


Рис. 4. Структура перетворювача частоти із ланкою постійного струму та керованим випрямником

Зазначені недоліки частково усуваються у структурі із НВ та автономним інвертором напруги (рис. 5) за рахунок використання ШІР або ШІМ, які використовуються для керування асинхронним двигуном (АД) малої і середньої потужності.

У цьому випадку вплив процесів перетворення на первинну мережу є мінімальним, а енергія, накопичена АД у режимах гальмування, розсіюється за допомогою резистора.

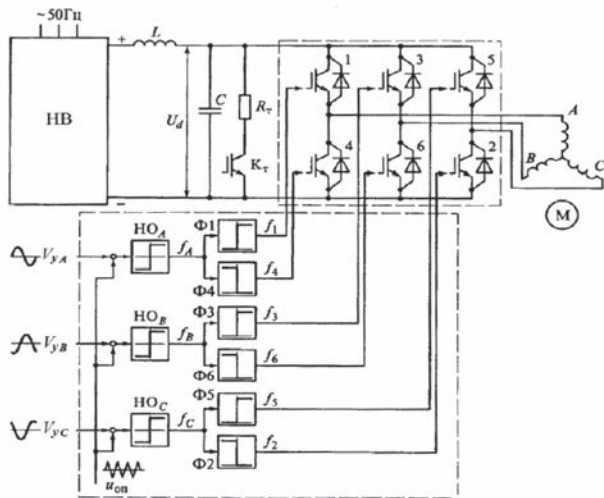


Рис. 5. Перетворювач частоти із трифазним інвертором і широтно-імпульсною модуляцією

Для рекуперації енергії у первинну мережу (ПЕКЛЮ великої потужності) використовуються структури (рис. 6) із активним випрямником напруги (АВН).

Пристрої управління ПЧ повинні реалізувати спосіб, який забезпечив би виконання двох основних вимог, висунутих до системи ПЧ-АД:

- мінімізація втрат у двигуні та мінімізація пульсацій моменту, зумовлених впливом полів першої і вищої гармонік;

– мінімізація втрат в елементах перетворення.

Ці вимоги є суперечливими, оскільки для покращення роботи двигуна потрібно підвищувати несущу частоту, а для зменшення втрат у перетворювачі її варто зменшувати. Крім того, двосторонній енергетичний зв'язок вимагає додаткових переключень у перетворювачі.

Проектування імпульсних перетворювачів є ітеративним процесом, який містить етапи функціонального проектування, розробки принципової схеми, проведення випробувань, доробки за їхніми результатами принципової або функціональної схеми.

Успішне розв'язання задач проектування можливе за сполучення комп'ютерних та аналітичних методів дослідження. Складність математичного опису електромагнітних процесів, які відбуваються у напівпровідникових перетворювачах, створює значні труднощі під час аналізу і синтезу режимів їх роботи. Тому нині значна увага приділяється розробці наближених методів дослідження електромагнітних процесів у квазівстановлених та перехідних режимах роботи імпульсних перетворювачів енергії.

Усі основні методи дослідження перетворювачів містять низку допущень: напівпровідникові елементи мають ідеальні характеристики, а комутація у ланцюгах відбувається миттєво. Як показали результати дослідження, ці допущення у більшості випадків на практиці виявляються прийнятними, аналіз перехідних і квазівстановлених процесів у перетворювачах зводиться до дослідження електричних ланцюгів зі стрибкоподібно змінними параметрами.

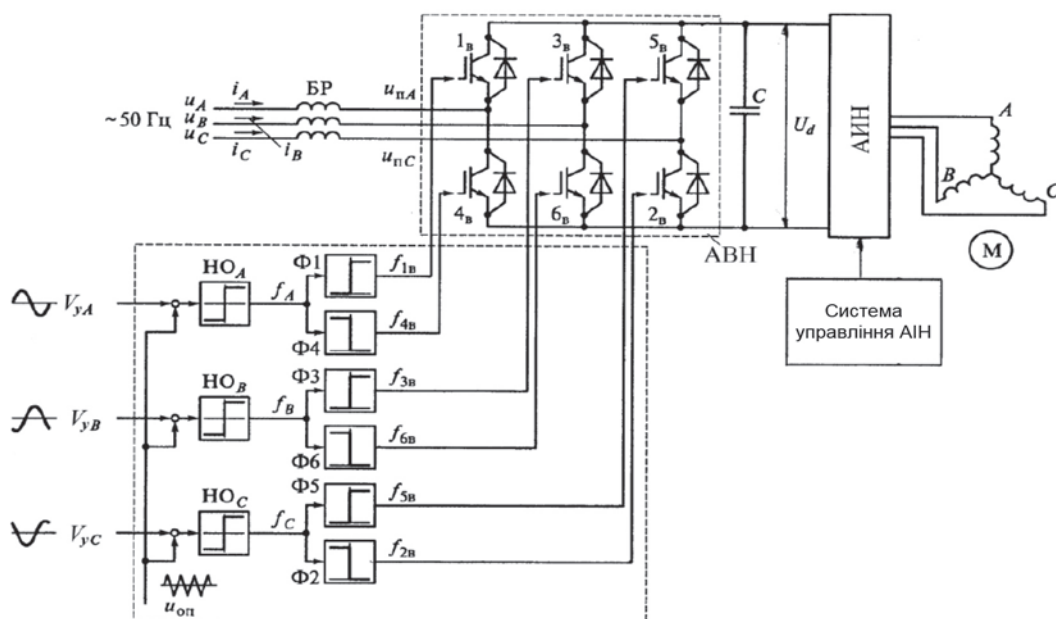


Рис. 6. Структура перетворювача частоти з активним випрямником

Вибір аналітичного методу і спрощень багато в чому залежить від цілей, які встановлюються під час аналізу. Методи аналізу поділяються на часові, спектральні та операторні, засновані на використанні комутаційних функцій і рядів Фур'є, кожний із яких має свою раціональну галузь застосування.

Із розвитком імпульсно-модуляційних способів управління на підвищених частотах зростає роль спектральних методів дослідження структур, в яких задані моменти замикання і розмикання ключових елементів, тобто структур на цілком керованих ключах. Для цих структур формується комутаційна функція $F_k(t)$, а сигнал на виході ключового блоку знаходиться у вигляді добутку комутаційної і вхідної $f(t)$ функції та представляється у формі тригонометричного ряду Фур'є. Подальший аналіз виконується методом накладення за схемами заміщення для кожної гармоніки. Цей підхід використовується під час аналізу гармонійного складу струмів і напруг та розрахунку енергетичних характеристик.

Для аналізу перехідних і квазівстановлених режимів вихідна координата представляється у вигляді:

$$Y(s) = L[f(t)F_k(t)]\Phi(s), \quad (1)$$

де $\Phi(s)$ – передаточна функція ланцюга навантаження.

Вихідна координата в часовій області знаходиться за допомогою зворотного перетворення Лапласа від $Y(s)$.

Робота імпульсного перетворювача у складі автономної суднової системи електроживлення висуває особливі вимоги до рівня і гармонічних характеристик складників, які надходять до загальної мережі судна і генеруються перетворювачем. Якщо якість вихідних параметрів перетворювача прямо залежить від вимог і типу споживача перетвореної величини, то завади, які генеруються перетворювачем у загальну мережу, повинні бути зведені до мінімуму і мати гармонічний склад, що мінімально впливає на інших споживачів у межах загальної автономної суднової мережі. Крім того, вихідні характеристики перетворювача повинні мінімально залежати від якості електроживлення у первинній мережі. Перераховані вимоги визначають пріоритетність застосування керованих перетворювачів із ланкою постійного струму. Для цього типу перетворювачів характерний мінімальний зміст вищих гармонік у вихідній напрузі інвертора за використання різних законів ШІМ. Водночас роль вихідних фільтрів у забезпеченні синусої-

дальності напруги також зводиться до мінімуму, оскільки відносний зміст вищих гармонік є незначним. Основні обмеження використання способу ШІМ полягають у складності побудови систем управління ключовими елементами. Із цією метою використовуються цілком керовані високочастотні напівпровідникові ключі, такі як IGBT і IGCT, із прямим мікропроцесорним управлінням.

Загальні структурні схеми управління багатофазним силовим приводом будуються за тими ж самими принципами, що і трифазні системи. Відмінності спостерігатимуться тільки в законах управління і за додаткових можливостей роботи в аварійних режимах, оскільки ці системи менш критичні до амплітуди і фази напруги живлення і можуть організувати обмежені режими роботи із неповною кількістю фаз.

Висновки. Сучасний етап розвитку систем електроприводу характеризується стійкою тенденцією переходу від виконавчих елементів постійного струму до виконавчих елементів змінного струму, задля реалізації частотного управління якими переважне застосування отримали перетворювачі частоти з явно вираженою ланкою постійного струму.

Залежно від техніко-економічних показників до системи ПЧ-АД використовуються структури ПЧ із розділним і спільним управлінням частотою і напругою, кожна з яких має свої переваги і недоліки. Наразі найбільшого поширення отримали перетворювачі частоти з некерованим випрямником та автономним інвертором напруги із синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією другого роду, що мінімізують вплив процесів перетворення на первинну мережу.

Для раціонального використання ресурсів управління у системі ПЧ-АД потрібно використовувати адаптивний підхід до вибору виду широтно-імпульсної модуляції залежно від частоти електромагнітного поля (ротора АД), що полягає у переході від прямокутного закону управління АІН у верхньому діапазоні частот електромагнітного поля до синусоїдального на підвищених частотах квантування в діапазоні низьких частот, здійснення яких вимагає використання мікропроцесорного управління і розроблення відповідного алгоритмічного забезпечення.

Для вирішення завдань динамічного синтезу імпульсних перетворювачів енергії практичний інтерес представляє розроблення алгоритмічних процедур синтезу з урахуванням квазівстановлених режимів без отримання усереднених моделей силової частини як об'єкта управління.

Список літератури:

1. Дмитриев Б.Ф. Автономные системы электропитания с многоуровневыми выпрямителями и широтно-импульсным регулированием : Дисс.. доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2002. 330 с.
2. Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования. Пер. з англ. Бермант М.А., Грин Ж.Л. Москва : Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. 455 с.
3. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. Москва : Издательский дом МЭИ, 2007. 631 с.
4. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. Москва : Энергоатомиздат, 2000. 495 с.
5. Белов М.П., Новиков А.Д., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов : учебник для высших учебных заведений. Москва : АСАДЕМА, 2004. 574 с.
6. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Москва : АСАДЕМА, 2006. 264 с.
7. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. Новосибирск : Наука, 1979. 297 с.
8. Ковчин С. А., Сабинин Ю. А. Теория электропривода : Учебник для вузов. СПб : Энергоатомиздат, 2000. 496 с.
9. Mao H., Fred C. Y. L., Borogevich D., Hiti S. Review of High-Performance Three – Phase Power-Factor Correction Circuits. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1997. Vol. 44, № 4. P. 437-446.
10. Mohan N., Tore M.U., William P.R. Power electronics: converters, applications and design. New York, 1995. 802 p.

Daki O.A., Yakusevich Yu.G., Kolesnik V.V., Trishin V.V. PULSE-MODULATORY REGULATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

The development of modern semiconductor devices and the growth of microprocessor technology have made it possible to apply complex laws of modulation in systems with pulse-modulation energy conversion in operation, as all ship equipment, and to ensure control of ship traffic. The problem of improving the technical and economic performance of autonomous ship power systems is complex and is associated with improving the quality characteristics of both primary and secondary energy converters in the projects of modernization and creation of new equipment, as well as optimizing energy consumption for specific types of electricity consumers, functional purpose. The purpose of the article is to reveal the main processes and construction of pulse-modulation control schemes of electric ship systems. Achieving the necessary technical and economic indicators (efficiency, reliability, quality of energy produced, electromagnetic compatibility, mass and size characteristics) of such secondary energy converters as converters with a section of direct current, requires the use of multiple switching with different modulation methods in combination with pulse-width also stepped principles of energy conversion.

It was determined that for rational use of control resources in the system frequency converter – induction motor it is necessary to use an adaptive approach to the choice of pulse-width modulation depending on the frequency of the electromagnetic field (rotor of induction motor), which consists in transition from rectangular control law to autonomous voltage inverter; the upper frequency range of the electromagnetic field to sinusoidal at high frequencies of quantization in the low frequency range, the implementation of which requires the use of microprocessor control and the development of appropriate algorithmic software.

To solve the problems of dynamic synthesis of pulsed energy converters, it is of practical interest to develop algorithmic synthesis procedures taking into account quasi-established modes without obtaining averaged models of the power part as a control object.

Key words: *electrical equipment, regulation, ship, control, pulse-width converter.*