

УДК 519.87:629.5.064.5

DOI 10.47049/2226-1893-2024-3-68-85

**НЕЧІТКІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ
СИСТЕМАМИ МАЛИХ БЕЗПЛОТНИХ МОРСЬКИХ СУДЕН**

С.М. Волянський

кандидат технічних наук, доцент

e-mail: vffogres@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7922-0441>

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

С.М. Галаган

старший науковий співробітник, здобувач

e-mail: serhiihalahan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7729-2979>

О.М. Мазур

кандидат технічних наук, доцент, дійсний віце-академік

Академії технічних наук України

e-mail: mazuronma@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9316-288X>

Г.В. Налева

кандидат технічних наук, доцент

e-mail: nalevagv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7841-6757>

В.Х. Корбан

кандидат технічних наук, доцент

e-mail: korban51@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-5542-3751>

Національний університет «Одеська морська академія»

В.А. Яременко

доцент

e-mail: onmusotrudnikov17@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0001-4797-7818>

Одеський національний морський університет

О.А. Онищенко

доктор технічних наук, професор,

Заслужений діяч науки і техніки України

e-mail: oleganaton@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3766-3188>

Національний університет «Одеська морська академія»

***Анотація.** Показано, що в малих безпілотних морських суднах найчастіше використовують електромеханічні системи різного типу. Ці системи забезпечують керування рулем судна, його рушійними пристроями, використовуються для інших допоміжних механізмів судна.*

З аналізу джерел встановлено, що електро-механічні системи ефективні в системах стабілізації руху суден, наприклад, у системах автопілоту.

При технічній реалізації автопілотів і електрорушіїв використовують різного типу контролери і до цього часу відсутні апробовані рішення щодо алгоритмів керування ними.

Показані основні принципи створення ефективних математичних моделей електромеханічних систем, побудованих на основі електричних двигунів. Ця побудова проходить за допомогою спрощення математичного опису двигунів і використання при моделюванні структурних схем.

Наведено можливості використання та обрання асинхронних трифазних електродвигунів, призначених для застосування у різних механізмах і системах електроприводу морських суден і, зокрема, у електрорушійних невеликих безпілотних плавальних апаратів.

Пропонується регулювання швидкості для таких двигунів здійснювати за допомогою керованого силового перетворювача при постійній частоті джерела живлення.

Наведена послідовність побудови моделі електромеханічної системи, яка регулює швидкість асинхронного двигуна.

Модель враховує нелінійні залежності двигуна (формула Клоса), «вентильторне» навантаження та нелінійні елементи типу «обмеження» системи регулювання.

Запропоновано використання у такій системі спрощеного нечіткого контролера, який відрізняється симетричною побудовою процедур фазифікації. Наведені результати моделювання електрорушійної системи малого безпілотного судна при використанні нечіткого контролера.

Запропоноване рішення дозволяє ефективно проводити подальший синтез контролерів керування автопілотів, рушіїв тощо, дозволяє попередньо визначати енергетичні втрати процесів регулювання.

***Ключові слова:** електропривод, асинхронний двигун, електрорушій, безпілотний плавальний апарат, математичне моделювання, структурні схеми, нечіткий регулятор.*

UDC 519.87:629.5.064.5

DOI 10.47049/2226-1893-2024-3-68-85

**FUZZY ELECTROMECHANICAL CONTROL SYSTEMS
SMALL MARINE UNMANNED VESSELS**

Volyanskyy Sergiy

PhD in Technology, Associate Professor

e-mail: vffogres@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7922-0441>

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Halahan Serhii

Senior Research Associate

e-mail: serhiihalahan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7729-2979>

Mazur Oksana

Ph.D. in Technology, associate professor,

active vice-academician of the Academy of Technical Sciences of Ukraine

e-mail: mazuronma@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9316-288X>

Naleva Halyna

Ph.D. in Technology, associate professor,

e-mail: nalevagy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7841-6757>

Korban Victor

Ph.D. in Technology, associate professor,

e-mail: korban51@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-5542-3751>

National University «Odesa Maritime Academy»,

Yaremenko Volodymyr

associate professor

e-mail: onmusotrudnikov17@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0001-4797-7818>

Odesa National Maritime University

Onishchenko Oleg

Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist and Technician of Ukraine

e-mail: oleganaton@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3766-3188>

National University «Odesa Maritime Academy»

Abstract. *It is shown that electromechanical systems of various types are most often used in small unmanned sea vessels. These systems provide control of the ship's rudder, its propulsion devices, and are used for auxiliary mechanisms. From the analysis of the sources, it was established that electromechanical systems are effective in the stabilization systems of ships, for example, in autopilot systems. In the technical*

implementation of autopilots and electric motors, different types of controllers will be used. Until now, there are no proven solutions for control algorithms. The main principles of creating effective mathematical models of electromechanical systems built on the basis of electric motors are shown. This construction is carried out by simplifying the mathematical description of engines and using them in the modeling of structural diagrams. The possibilities of using and selecting asynchronous three-phase electric motors intended for use in various mechanisms and electric drive systems of marine vessels are given. In particular, in the electric motors of small unmanned watercraft. It is proposed to adjust the speed for such motors using a controlled power converter at a constant frequency of the power source. The algorithm for building a model of an electromechanical system that regulates the speed of an asynchronous motor is given. The model takes into account non-linear dependencies of the engine (Clos-formula), «fan» load and non-linear elements of the «restriction» type of the regulation system. It is proposed to use a simplified fuzzy controller in such a system, which is characterized by a symmetrical construction of fuzzification procedures. The results of modeling the electric propulsion system of a small unmanned vessel using a fuzzy controller are given. The proposed solution makes it possible to effectively carry out further synthesis of autopilot and thruster control controllers, and allows to predetermine energy losses of regulation processes.

Keywords: *electric drive, asynchronous motor, electric motor, unmanned floating device, mathematical modeling, structural diagrams, fuzzy controller.*

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження автономних надводних морських суден привернуло широкую увагу суднобудівної галузі завдяки універсальності застосувань таких суден у морських дослідженнях, у моніторингу навколишнього середовища, океану, при порятунку і транспортуванні, розмінуванні тощо [1-4]. Управління рулем (стерном) та рушіями автономного судна є основою та ядром сучасної автономної навігації, безпеки мореплавання, загальної ефективності експлуатації.

Найчастіше, завдання автоматичного керування морськими суднами та ведення судна за маршрутом вирішуються спеціальними бортовими обчислювально-керуючими системами і комплексами (*Track Control Systems – TCS*). Їх завданням є компенсація зносу судна – керуючи, у необхідному напрямку, зміною його курсу та боковим відхиленням від заданого шляху. Загалом, комплекс керуючого (інформаційного, програмного, апаратного) обладнання, що входить у систему стабілізації курсу (*Heading Control System – HCS*) виконує функції автопілотування судна. У більшості випадків, сучасний автопілот: а) автоматично утримує судно на заданому курсі із точністю, при якій середнє значення курсу може відрізнитися від заданого курсу лише на заздалегідь визначений кут та при тій швидкості руху, що забезпечує стійку керованість судном; б) забезпечує амплітуду ризику, що не перевищує допустиму при порівнянні з ручним управлінням; в) забезпечує утримання судна на заданому курсі з мінімальним навантаженням на рульовий пристрій [5-8].

Головними завданнями для автопілоту малого безпілотного морського судна (МБМС) є автоматичне утримання на заданому курсі судна, забезпечення

переходу судна з курсу на курс із заданою кутковою швидкістю чи радіусом, узгоджене управління (сумісно із убудованою електронною картографічною навігаційно-інформаційною системою (ЕКНІС) рухом судна вздовж заданої траєкторії чи за зовнішніми цільовими вказівками) [1-3; 5-7].

Безумовно, на маневрені характеристики автономних суден малої водотонажності безпосередньо впливають не тільки якість алгоритмів роботи суднового автопілоту [5-8], а і його електромеханічні системи – рульова та електрорушійна. У обох випадках, головними елементами цих систем є контролери (регулятори) і виконавчі механізми.

Сучасні електрорушії та інші додаткові електромеханічні комплекси і системи МБМС є автоматизованими і включають в себе велику кількість різноманітного електрообладнання, пристроїв, засобів автоматизації, систем зв'язку тощо. Основними виконавчими елементами у різноманітних комплексах і системах МБМС є електричні машини та засоби автоматизації різних механізмів плавального апарату. Загалом, саме вони, їх властивості та параметри, насамперед, визначають основний експлуатаційний процес МБМС та надійність виконання ним необхідних завдань. При цьому відомо [1-4, 7-10], що використання електромеханічних систем для керування МБМС є найбільш перспективними [1-3; 6; 10] і ефективними у експлуатації і виробництві таких апаратів. Особливої уваги дослідників і проєктувальників потребують МБМС невеликого дедвейту та потужності двигуна електрорушії до 20 кВт.

Враховуючи сучасний стан розвитку теорії електричних машин та теорії машин і механізмів, теорії автоматичного управління, систем управління електроприводами і середовищ імітаційного моделювання, найпростішим способом підвищення комплексної результуючої ефективності створеного судна є проведення попередніх «оптимізаційних» наукових досліджень.

Метою таких досліджень є оптимізація за заданими критеріями техніко-експлуатаційних характеристик судна, зокрема – підвищення загальної ефективності, використаних у механізмах суден, електроприводів (наприклад, з безщітковими двигунами). Це здійснено на основі використання відомих загально-теоретичних (фізичних) принципів функціонування електричних двигунів одночасно з математичним моделюванням.

Саме тому дослідження, які спрямовані на підвищення результуючої ефективності (енергетичної, якості процесів керування, експлуатаційної тощо) судових систем, механізмів і комплексів, що функціонують на основі безщіткових електродвигунів, є актуальними і відповідають напрямкам розвитку сучасного морського флоту [4; 6-9].

Метою статті є визначення можливостей нечітких контролерів при використанні асинхронних трифазних (безщіткових) електричних двигунів у електромеханічних системах різного типу для малих безпілотних суден у режимах регулювання швидкості при змінах напруги при постійній частоті мережі живлення, визначенню принципів побудови математичних моделей таких систем на основі структурних схем.

Основний матеріал дослідження. Якість процесів маневрування та стабілізації заданого (необхідного) курсу МБМС за шляховими (реперними) точками забезпечується контролерами виконавчих механізмів. Зараз найбільш поширеними є пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) алгоритми побудови контролерів для системи автоматичного рульового керування і стабілізації швидкості електроруху судна. Науковцями і морськими інженерами розроблені численні інноваційні алгоритми, такі як: бекстепінг, прогнозує керування (МРС), ковзний режим керування, нечітка логіка керування, керування за допомогою нейронних мереж тощо. Тим не менше, традиційний або модифікований ПІД-алгоритм, все ще є найпопулярнішим у морських навігаційних застосуваннях [5; 6; 8-10]. Основні причини широкого використання ПІД-контролерів у навігаційному застосуванні (системи стабілізації курсу і електроруху системи) пов'язані із, по-перше, складнощами побудови і технічної реалізації контролерів з інноваційними алгоритмами, і, по-друге, із простотою і доброю апробованістю ПІД-алгоритмів керування.

Однак звичайний ПІД-алгоритм не може забезпечити задовільну якість процесів регулювання за наявності у об'єкті (корпус автономного судна і його виконавчі механізми) нелінійних елементів, елементів, що описуються системами високого порядку і які мають змінні параметри. Крім того, параметри традиційних ПІД-контролерів повинні бути налаштовані вручну оператором відповідно до змін умов навігації. Тому адаптивність судна у автономному плаванні дуже низька, і такі за допомогою таких контролерів неможливо досягти задовільного керуючого ефекту [4; 6; 8-10].

Якщо взяти до уваги концепцію модульності [4-7; 9; 10] побудови МБМС, мінімізації кінцевої ціни судна, можливості його застосування за багатоцільовим призначенням (у тому числі – подвійним), то виникає актуальне науково-технічне завдання – необхідність у використанні не тільки найпростіших технічних рішень, а і рішень, що ґрунтуються на реальних, наявних складських (невикористаних) запасах обладнання (двигунів, перетворювачів, редукторів тощо) і можливостей логістичного забезпечення (постачання, складування, збирання тощо), технічних спроможностях підприємств, швидкості проектування та створення необхідної технічної документації та оснастки для серійного виробництва МБМС.

Саме тому дуже велика увага приділяється таким, розумно спрощеним, методам математичного моделювання, які дозволяють дуже швидко оцінювати основні тактико-технічні характеристики (ТТХ) проєктованого МБМС, його основних складових систем і комплексів. При цьому дуже важливо знайти і використати такий математичний опис основних процесів у різноманітних виконавчих електричних двигунах та системах управління МБМС, який дозволяє ефективно і швидко провести наступні (найчастіше – багаторазові, ітераційні) розрахунки інших систем і пристроїв МБМС [6-10].

Таким чином, дуже важливим є аналіз таких принципів побудови математичних моделей (ММ) електромеханічних систем МБМС, наприклад – електроруху, на основі структурних схем асинхронних електричних двигунів, які, у подальшому застосуванні та удосконаленні ММ, можуть ефективно використовуватися при синтезі контролерів МБМС із заданими критеріями якості процесів

регулювання, при необхідності – урахувати (одночасно) електромагнітні, електро-механічні і енергетичні процеси систем, що досліджується та проектується.

При деякому спрощенні автоматизовані електричні машини змінного струму уявляють собою електромеханічні динамічні системи-перетворювачі із зосередженими параметрами, процеси в яких у загальному випадку описуються звичайними нелінійними диференціальними рівняннями (ДР). Якщо питання адекватного реального фізичним процесам математичного опису електричних машин постійного струму, в основному, розв'язані, то щодо машин змінного струму різні наукові школи використовують різні модифікації систем ДР для опису таких (відносно консервативних за схемами побудови та конструкціями) машин, як синхронний генератор і асинхронний двигун (АД).

Вигляд ДР рівнянь електричних машин змінного струму залежить від вибору виду змінних (фазні, перетворення координат), напрямку векторів потоко-зчеплень, напруги, чергування координатних осей для перетворених змінних, вихідного режиму (генераторний, руховий) та інших чинників. Крім того, вигляд рівнянь суттєво залежить від прийнятих при їх виведенні припущень.

Явища, що супроводжують електромагнітні перехідні процеси в електричних машинах взагалі, та у АД зокрема, надзвичайно складні. Встановити і визначити математичні залежності та закономірності, яким би абсолютно точно підкорялися описувані процеси, практично неможливо через великі математичні труднощі (невизначеність) і відсутність змінюваних (за часом, за іншими параметрами) емпіричних коефіцієнтів. Підкреслимо, що при реалізації конкретних технічних завдань проектування і подальшій побудові електромеханічних систем (рульових, електрорухійних, допоміжних тощо) МБМС не має особливої необхідності у використанні найбільш точних (дуже складних та затратних) методів, що одночасно описують електромагнітні і електромеханічні процеси. Цю задачу проектування можна розв'язати шляхом більшого або меншого наближення, тобто, нехтуючи більшою або меншою кількістю прийнятих другорядних факторів, які все ж так чи інакше впливають на процес моделювання – шляхом використання спеціальних перетворень математичних рівнянь, наближених рішень, аналітичних описів.

У першому випадку дослідження перехідних процесів у реальних умовах зводиться до дослідження їх в більш простих, ідеалізованих, умовах. У другому випадку – при тих самих допущеннях і точності досягається більш просте та зручне у роботі математичне формулювання. Точність дослідження та складність математичних рівнянь, зазвичай, підвищується із збільшенням числа факторів, що приймаються до уваги, та в залежності від методів перетворення рівнянь. Мистецтво математичного моделювання полягає у тому, щоб із основних факторів, які впливають на перебіг процесів, обрати суттєві, тобто такі, які забезпечать необхідну прийнятну точність та простоту виконання поставленої задачі при обмеженнях часу і вартості [6-10].

На протязі останніх десятиріч було прийнято користуватися математичними рівняннями, складеними на основі певного ряду допущень, які реальну асинхронну машину замінюють ідеалізованою. Ідеалізована електрична машина має у порівнянні з реальною наступні чотири основні відмінності:

- 1) відсутність насичення магнітних ланцюгів;
- 2) відсутність втрат у сталі та витиснення струму в обмотках;
- 3) синусоїдальний розподіл у просторі кривих сил, що намагнічують, та магнітних індукцій;
- 4) незалежність індуктивних опорів розсіювання від положення ротору та від струму в обмотках. Указані допущення значно спрощують математичний опис будь-яких електричних машин, у тому числі асинхронних. Якщо ж необхідно врахувати якісь із перерахованих допущень, то у рівняння вводять необхідні доповнення та поправки у значення параметрів [4; 6-10].

Нехтування насиченням та втратами у сталі значно спрощує математичний опис, тому що дозволяє користуватись лінійною залежністю між силами, що намагнічують, та магнітними потоками. Наприклад, характеристика холостого ходу при цьому буде прямою лінією, тангенс кута нахилу якої до вісі ординат можна вважати пропорційним магнітному опору повітряного проміжку (зазору між статором і ротором). За відсутності втрат у сталі струми та сили, що намагнічують, співпадають за фазою зі створюваними ними струмами. Ідеалізація АД вказаним шляхом, дозволяючи значно спростити ММ, забезпечує, проте, збереження у допустимих межах дійсної картини динамічних і енергетичних процесів, що відбуваються у реальній електричній машині, та цілком прийнятну точність при розв'язанні практичних задач проектування електрорушіїв, рульових систем і допоміжних механізмів МБМС.

Розглянемо приклад. Як відомо, опір руху будь якого морського судна збільшується (приблизно, пропорційно другому ступеню швидкості) при збільшенні швидкості судна («вентиляторна» механічна характеристика, рис. 1). Також відомо, що найбільш технічно проста схема регулювання швидкості АД заснована на принципі змінювання напруги живлення двигуна при незмінній (постійній) частоті мережі. У такому режимі регулювання суттєво змінюється критичне ковзання і за рахунок цього змінюється нахил механічної характеристики АД (рис. 1, характеристики при різних напругах силового перетворювача при постійній частоті f живлення). За рахунок накладання цих двох характеристик досягається ефект регулювання швидкості, що дозволяє будувати досить прості розімкнені і замкнені за швидкістю системи керування електрорушійними. При цьому можна використовувати найбільш простий і поширений математичний опис електро-механічних процесів АД (формули Клоса, зв'язок між моментом, струмом і напругою живлення тощо).

Наприклад, якщо у систему регулювання напруги асинхронного двигуна при незмінній частоті живлення ввести датчик швидкості і врахувати закон змінювання навантаження від швидкості, то у спрощеному вигляді структурна модель електрорушії з асинхронним двигуном може бути представлена у вигляді, як наведено на рис. 2.

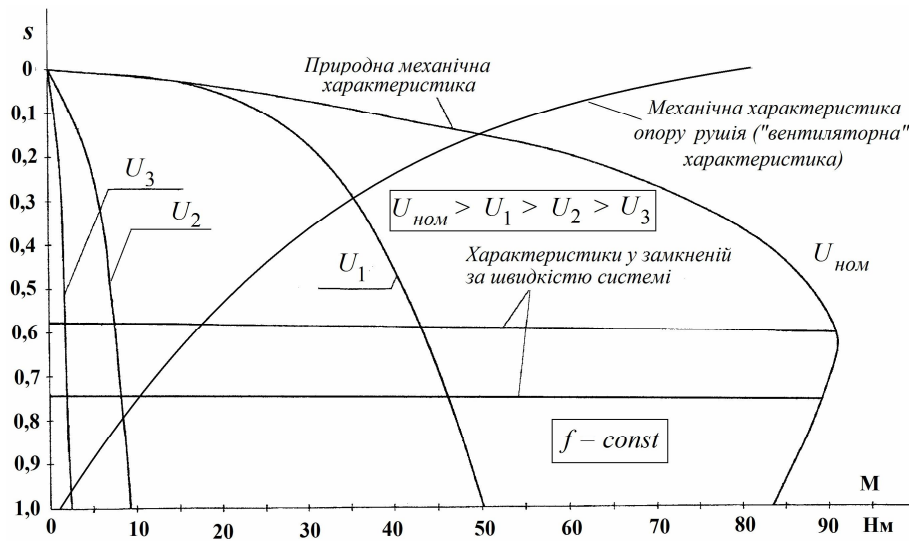


Рис. 1. Типові механічні характеристики електрорушій (s – ковзання, в. о., M – момент двигуна, Нм, U – напруга живлення АД, В)

На рис. 2 позначено:

ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу АД, рад/с;

ω_D – швидкість ротора АД, рад/с;

J_C – сумарний момент інерції, кг·м²;

«X» – блок множення;

p – оператор Лапласа, 1/с;

M_D, M_C – момент двигуна і момент опору руху, відповідно, Нм;

$K_{ТП}$ – коефіцієнт передачі силового перетворювача напруги;

K_{OC} – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю, В·с/рад;

$U_{ТП}$ – напруга на виході силового перетворювача, В;

U_{OC} – напруга на виході давача швидкості, В;

ΔU – сигнал помилки регулювання швидкості, В;

$U_3, U_{3И}$ – сигнали завдання швидкості, В.

Вже такого представлення (рис. 2) достатньо для синтезу за необхідними критеріями контролера керування тиристорним перетворювачем.

Для урахування зв'язку «напруга-момент-швидкість» використаємо наступну послідовність розрахунку.

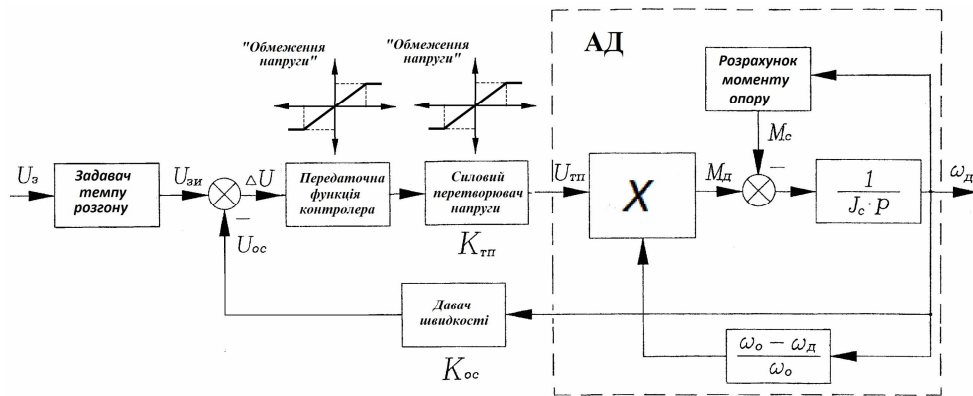


Рис. 2. Узагальнена спрощена структурна схема системи управління електрорушійем МБМС, яка побудована на основі регулювання напруги АД

1. Розраховуємо на першому кроці швидкість ідеального холостого ходу ω_{01}

$$\omega_{01} = \omega_0 \text{sign}(U_{ТП}),$$

де функція $\text{sign}(U_{ТП})$ визначає знак сигналу напруги $U_{ТП}$ силового перетворювача.

2. Розраховуємо поточне значення ковзання s на основі вимірювання швидкості двигуна

$$s = 1 - \omega_д / \omega_{01}.$$

3. Розраховуємо критичний момент M_{K1} АД на цьому кроці

$$M_{K1} = M_K (U_{ТП} / U_{ТП \max})^2 \cdot \text{sign}(U_{ТП}),$$

де $U_{ТП \max}$ – максимально можлива напруга на виході силового перетворювача, В;
 M_K – максимальний критичний момент АД, Нм.

4. Розраховуємо поточний момент $M_д$ двигуна за формулою Клоса

$$M_д = \frac{M_{K1} (2as_K + 1)}{s_K / s + s / s_K + 2as_K},$$

де s_K – критичне ковзання при номінальній напрузі, в. о.;

a – конструктивний коефіцієнт АД, в. о.

5. Розраховуємо реактивний момент опору M_C на основі визначення знаку швидкості ротора двигуна

$$M_C = M_{ИД} \text{sign}(\omega_д),$$

де $M_{ИД}$ є розрахунковим значенням моменту опору, у якому нескладно додатково урахувати квадратичну (або іншого вигляду) залежність моменту опору від швидкості АД електрорушії.

6. На основі рівняння руху визначаємо швидкість АД на цьому кроці і здійснюємо операцію інтегрування (наприклад, метод Ейлера першого порядку точності) для наступних приростів часу Δt

$$\omega_d = \omega_{d-1} + (M_d - M_c) \frac{\Delta t}{J_c},$$

де поточне значення часу t на наступному кроці розрахунку має приріст Δt

$$t = t + \Delta t.$$

Для обліку електромагнітних процесів, до розрахунку необхідно включити інші, досить прості залежності, отримані на основі, наприклад, схем заміщення АД.

Аналіз динаміки роботи схеми, що наведена на рис. 2, при її функціонуванні з налаштованим на «модульний оптимум» ПІД-контролером показав, ПІД-алгоритм при наявних нелінійних елементах у системі ефективно функціонує лише у досить вузькому діапазоні змін параметрів. Низька якість пояснюється, також і дією зміни моменту інерції судна, що властиво навіть при нормальних умовах функціонування судна. Саме тому пропонується використання для наведеної схеми (рис. 2) нечіткого контролера.

Нечітке керування має властивості робастності, а поєднання кількох нечітких контролерів (НК) дозволяє одержання добрих динамічних властивостей системи, причому невелика кількість правил НК надає покращених властивостей узагальнення. Слід зазначити, що з метою забезпечення сумісності обладнання, а також забезпечення його конкурентоспроможності, технічна реалізація НК повинна відповідати стандарту МЕК IEC 61131-7 (*Part 7. Fuzzy logic standartization*), що пред'являється до програмованих мікроконтролерів (МК). Цей стандарт вводить типові закони опису елементів нечіткого управління мовами програмування контролерів, зафіксованих у IEC 61131-3. Для аналогових об'єктів управління, це, наприклад, мова *Function Block Diagram (FBD)*. Стандартом визначаються модель та функціональні елементи НК (див. рис. 4): розмиття (*fuzzification*), зворотне ущільнення (*defuzzification*), які виробляють правила за алгоритмом послідовних операцій об'єднання (*aggregation*), активації (*activation*), накопичення (*accumulation*), визначаються команди родової мови *Fuzzy Control Language (FCL)* розробки нечітких систем управління.

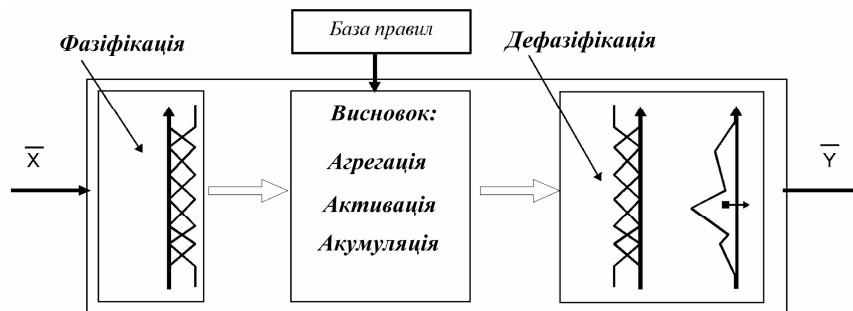


Рис. 4. Функціональні елементи НК

На етапі фазифікації (перетворення точних вхідних змінних на їх нечіткі, лінгвістичні, значення) допустимий діапазон D зміни вхідних змінних розбивається на якісні множини-терми (мале заперечне – NS , нульове – Z , мале позитивне – PS тощо), а ступінь приналежності змінних множині визначається функціями приналежності (ФП) множині $\mu_j(\bullet)$, що задовольняють для будь-якої x_i умови спроможності: $\sum_j \mu_j(x_i) = 1$ (див. рис. 5). Фазифікація здійснюється не менше ніж для двох вхідних змінних.

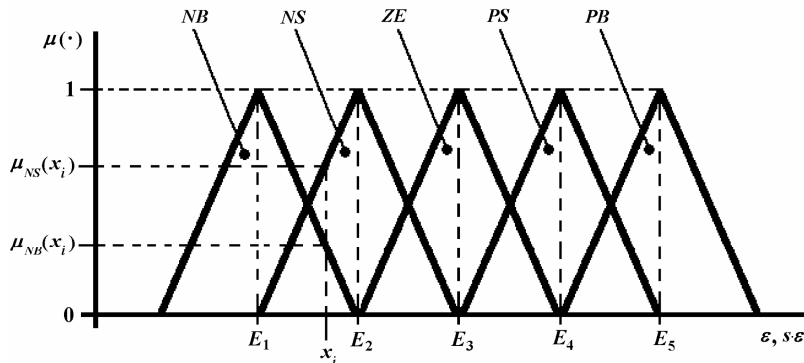


Рис. 5. Функції приналежності НК

Змінні, за допомогою функцій приналежності, перетворюються на відповідні логічні змінні, причому всі вхідні змінні (терми) вважаються незалежними вибірками. При перетвореннях логічних змінних здійснюється логічний висновок, заснований на урахуванні правил, сформульованих експертами предметної області. Сукупність нечітких правил $\bar{A} \Rightarrow \bar{B}$, записується як

$$\langle \text{Якщо} \rangle (x_1 \in A_1) \langle \text{І} \rangle \dots (x_i \in A_i) \langle \text{І} \rangle \dots (x_n \in A_n) \langle \text{ТОДІ} \rangle (y \in B_i). \quad (1)$$

Реалізація перетворень (1) потребує знаходження ФП. Найбільш простий випадок представлення логічних змінних – помилка регулювання x_1 та її похідна x_2 з трикутними ФП (\bullet) (див. рис. 5). Операція $\langle \text{І} \rangle$ у (1) відповідає перетину множин, а результат застосування всіх правил відповідає операції об'єднання (агрегації) множин. Сучасні нечіткі МК (ф. *Adaptive Logic*, ф. *Texas Instruments* і ін.) мають повну підтримку введення/виведення змінних, уніфіковані системи команд для всіх етапів фазифікації, логічного висновку та дефазифікації (рис. 4).

Основна складність застосування нечіткого МК полягає в розробці ефективної бази правил. Число правил залежить від числа вхідних змінних та числа значень лінгвістичних змінних (нечітких множин).

Реалізація нечіткого ПД-регулятора вимагає запису тривимірної таблиці правил (кількість правил, при однаковій кількості терм-елементів по входах, визначається, як число лінгвістичних змінних у ступені числа вхідних змінних).

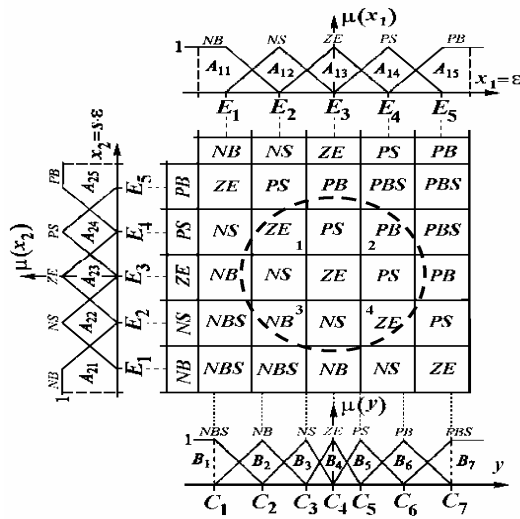


Рис. 6. Зв'язок функцій приналежності і таблиці правил НК

Запис таблиці, навіть за допомогою експертів, надзвичайно складно формувати для конкретного об'єкта управління. Саме з цієї причини НК можуть являти собою багатоканальні системи, що містять, наприклад, П-, І- і Д-канали. Вважаємо, що вхідні сигнали (терми) розбиті на 5 множин, а вихідний сигнал на 7 множин. Представимо сукупність правил у табличному вигляді для, наприклад, одного з каналів НК – пропорційного (див. рис. 6, [6]).

Запис правил виходу формалізуємо, використовуючи запропонований у [5; 6] принцип симетричного запису логічного висновку: шляхом розвороту стовпця змінної x_2 по вертикалі проти загальноприйнятим поданням для напрямів стовпців таблиць. Отримана таким чином таблиця правил монотонна, що підвищує стійкість роботи замкнутої системи та враховує виконання очевидної умови $\varepsilon \cdot s \cdot \varepsilon < 0$ для статичного режиму (при $\varepsilon \in ZE$ і $s \cdot \varepsilon \in ZE$, $\varepsilon \rightarrow 0$ і $s \cdot \varepsilon \rightarrow 0$). Для асинхронного двигуна з параметрами 15,5 кВт, 380 В, 50 Гц, 1404 об/хв, 106 Нм синтезовано схему стабілізації швидкості з ПІ-контролером. Силовий перетворювач – найпростіший регулятор напруги з інерційною частиною близько до 0,03 с, давач швидкості – імпульсний тахогенератор з фільтром інерційністю 0,015 с. Використався ПІ-контролер швидкості, налаштований при лінеаризації системи на «симетричний» оптимум, який працює з задавачем інтенсивності на вході, з метою зменшення перерегулювання. У систему вносилося періодичне збурення (5 Нм, 200 рад/с). Навантаження несе характер квадратичної залежності. Необхідно підкреслити, що система суттєво нелінійна (регулятор напруги має обмеження на рівні 380 В, регулятор швидкості на рівні ± 10 В, навантаження «вентиляторного характеру», АД – згідно п.п. 3; 4 наведеної вище послідовності розрахунку моделі АД. До того ж, необхідно взяти до уваги, що малі морські безпілотні судна, з позицій керування їх рухом, є нелінійними системами. Це пояснюється тим, що будь-які зміни швидкості, осадки, маси чи режиму руху, приводять до суттєвих

змін динамічних характеристик і параметрів судна (приєднанні маси, момент інерції, площа змоченої поверхні, режим глісеру тощо). При цьому необхідно ураховувати, що на судно безперервно діють збурення у вигляді вітру і хвиль, течії, мілководдя тощо, що приводить до відхилення від заданого курсу. Ці збурення суттєво ускладнюють задачі стабілізації курсу судна і, загалом, електрорушії. Моделювання системи стабілізації швидкості з ПІ-контролером довело, що така система підтримує належну якість функціонування судна лише у вузькому діапазоні змін параметрів об'єкту регулювання. А при змінах, наприклад, моменту інерції, збурення, чи інших параметрів, що описують модель судна (наприклад, параметрів моделі Номото), суттєво погіршується якість процесів регулювання.

Саме тому використано нечіткий контролер, побудований за правилами, наведеними на рис. 6. Схема моделі системи наведена на рис. 7.

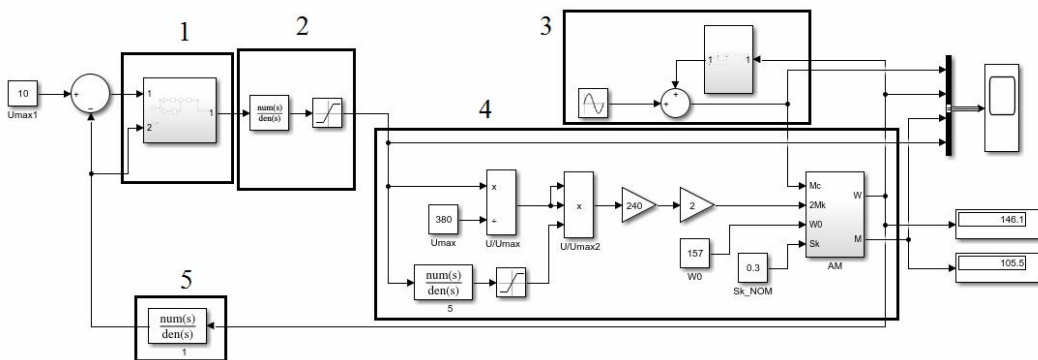


Рис. 7. Матлаб-модель системи стабілізації швидкості електрорушії з НК

На рис. 7 позначені елементи моделі:

- 1 – НК з обмеженням вихідного сигналу;
- 2 – силовий перетворювач напруги з обмеженням напруги;
- 3 – «вентиляторне» навантаження і періодичне збурення;
- 4 – АД;
- 5 – тахогенератор з фільтром.

На рис. 8, 9 та 10 наведені деякі результати моделювання системи с НК при її роботі без задавача інтенсивності. На рисунках позначено:

- 1 – напруга на виоді силового перетворювача, В;
- 2 – момент двигуна, Нм;
- 3 – швидкість, рад/с;
- 4 – момент навантаження, Нм.

Аналіз наведених результатів моделювання (рис. 8; 9 та рис. 10) доводить, що запропонована система стабілізації електрорушії з НК ефективно функціонує у будь яких умовах експлуатації, а якість процесів регулювання, зокрема – швидкості, є задовільною.

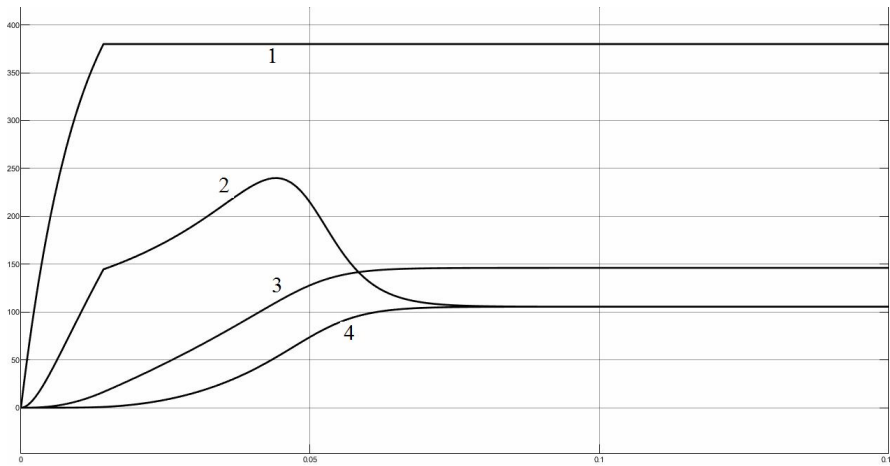


Рис. 8. Пуск у системі з НК при номінальних умовах і відсутності збурення

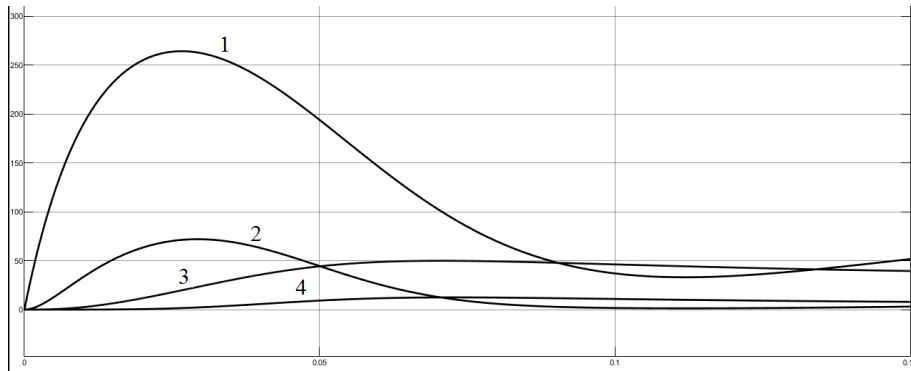


Рис. 9. Пуск у системі з НК на низьку швидкість і відсутності збурення

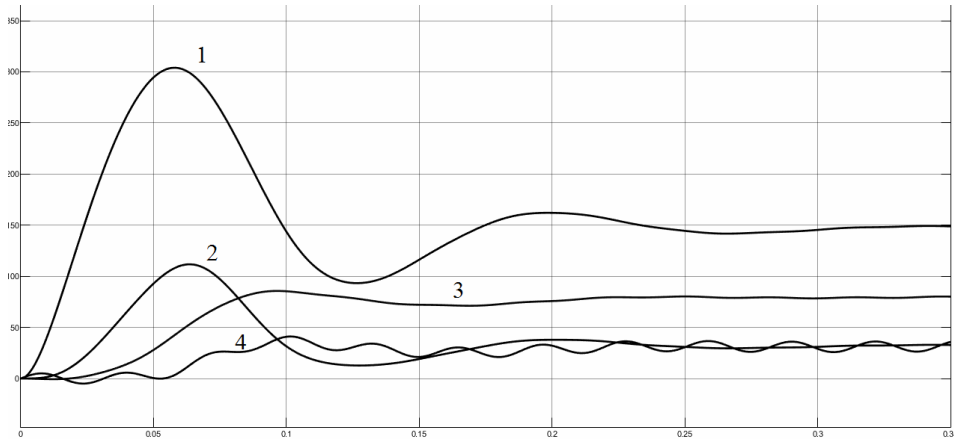


Рис. 10. Пуск у системі з НК на середню швидкість і дії періодичного збурення

Висновки. Структурне уявлення електрорушійного пристрою на основі асинхронного двигуна з перетворювачем напруги, який працює при незмінній часті живлення, та з урахуванням прийнятих припущень та спрощень дозволяє легко реалізувати, наприклад, засобами *MatLab/Simulink*, його математичну модель і подальший синтез контролерів (рулевих, швидкості руху, автопілотування, допоміжних механізмів) МБМС.

Швидкість побудови і дослідження математичних моделей електрорушійів МБМС на основі структурних перетворень і урахування лише найголовніших факторів і параметрів АД і силового перетворювача є основною перевагою при практичній реалізації МБМС, при багатоваріантному пошуку найкращого технічного рішення з його побудови.

Пропоноване рішення системи стабілізації руху МБМС з НК і регулятором напруги живлення АД є дієвим, що підтверджується моделюванням основних процесів (напруги, швидкості, моменту тощо) і дозволяє подальший синтез аналогічних систем стабілізації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Волянський С.М., Волянська Я.Б., Онищенко О.А. Тренди розвитку багатоцільових автономних плавальних апаратів подвійного призначення. Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах: збірник XX науково-технічної конференції, 03-04 вересня 2020 р. – С. 52-54. ДНДІ ВС ОВТ. – Чернігів: Видавець Брагинець О.В., 2020. – 295 с.
2. Волянська Я.Б., Волянський С.М., Онищенко О.А. Особливості прийняття конструктивних рішень при створенні пропульсивного комплексу автономного плавального апарату подвійного призначення. II Міжн. наук.-практ. морська конф. кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2020 (Marine Power Plants and Operation). – С. 119-123.
3. Волянська Я.Б., Волянський С.М., Мазур О.М., Сапіга В.В., Онищенко О.А. Сучасний стан розвитку багатоцільових автономних плавальних апаратів подвійного призначення та їх автоматизованих систем керування. IV Всеукраїнська науково-практична конференція «Воєнно-історична робота у Військово-Морських Силах Збройних Сил України. Проблемні питання та шляхи їх вирішення». 2021/11/25. – НУ «ОМА», 2021. – С. 54-56.
4. Сапіга В.В., Онищенко О.А., Шуміло О.М. Розвиток сучасних військово-морських сил Збройних Сил України: модульні концепції. Водний транспорт, № 2 (36), 2022, с. 104-120.
5. Volyanskyu S., Vorokhobin Ig., Volyanskaya Ya., Mazur O., Onishchenko O. Marine ship's course stabilization based on an autopilot with a simple fuzzy controller. Scientific Bulletin of Naval Academy, 2022. Vol. XXV, Iss. 1, P. 23-35. (Series B: Electrical Engineering, Automation and Computer Sciences). DOI: 10.21279/1454-864X-22-I1-003.

6. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S. etc. Application of fuzzy controllers in automatic ship motion control systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 13, No. 4, August 2023, P. 3948~3957. ISSN: 2088-8708. DOI: 10.11591/ijece.v13i4.pp3948-3957.
7. Голіков В.А., Налева Г.В., Мазур О.М., Онищенко О.А. Нечіткій регулятор автостерна малого безпілотного морського судна. *Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт»*, 20.03.2024 – 21.03.2024. – С. 11-15. – Одеса: НУ «ОМА», 2024. – 306 с.
8. Налева Г.В., Онищенко О.А. Спрощена математична модель асинхронного електрорушії морських безпілотних суден. XIII міжнародна науково-технічна конференція «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика» (SEIEA-2023), 22-23 листопада 2023 – С. 133-138. <http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/SEIEA-2023.22.11.23.pdf>.
9. Мазур О.М., Ярим Д.М., Онищенко О.А. Аналіз тенденцій розвитку систем управління морськими безпілотними суднами. *Науково-теоретична конференція «Судноводіння, морські перевезення та технології» NST-2023*. 16-17 листопада 2023. – С. 111-115. – Одеса: НУ «ОМА».
10. Onishchenko O., Melnyk O., Onyshchenko S., etc. Development of simplified mathematical models of asynchronous electric motor systems for multipurpose unmanned vessels. *The 1st Trunojoyo Madura International Conference of Science and echnology*, 29 November 2023, Indonesia. – P. 456-460. https://lppm.trunojoyo.ac.id/rushmore_event/1st-tmic-trunojoyo-madura-international-conf/; <https://tmic.ptti.info/#topic>.

REFERENCES

1. Volianskyi S.M., Volianska Ya.B., Onishchenko O.A. Trendy rozvytku bahatotsilovykh avtonomnykh plavalnykh aparativ podviinoho pryznachennia Stvorennia ta modernizatsiia ozbroiennia i viiskovoi tekhniky v suchasnykh umovakh: zbirnyk XKh naukovo-tekhnichnoi konferen-tsii, 03-04 veresnia 2020 r. – S. 52-54. DNDI VS OVT. – Chernihiv: Vydavets Brahynets O.V., 2020. – 295 s.
2. Volianska Ya.B., Volianskyi S.M., Onishchenko O.A. Osoblyvosti pryiniattia konstruktyvnykh rishen pry stvorenni propulsvynoho kompleksu avtonomnoho plavalnoho aparatu podviinoho pryznachennia II Mizhn. nauk.-prakt. morskа konf. kafedry SEU i TE Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu (MPP&O-2020 (Marine Power Plants and Operation). – S. 119-123.
3. Volianska Ya.B., Volianskyi S.M., Mazur O.M., Sapiha V.V., Onishchenko O.A. Suchasnyi stan rozvytku bahatotsilovykh avtonomnykh plavalnykh aparativ podviinoho pryznachennia ta yikh avtomatyzovanykh system keruvannia. IV Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia «Voienno-istorychna robota u Viiskovo-Morskykh Sylakh Zbroinykh Syl Ukrainy. Problemni pytannia ta shliakhy yikh vyrishennia». 2021/11/25. – NU «ОМА», 2021. – S. 54-56.

4. Sapiha V.V., Onyshchenko O.A., Shumilo O.M. Rozvytok suchasnykh viiskovo-morskykh syl Zbroinykh Syl Ukrainy: modulni kontseptsii. Vodnyi transport, № 2(36), 2022, P. 104-120.
5. Volyansky S., Vorokhobin Ig., Volyanskaya Ya., Mazur O., Onishchenko O. Marine ship's course stabilization based on an autopilot with a simple fuzzy controller. Scientific Bulletin of Naval Academy, 2022. Vol. XXV, Iss. 1, P. 23-35. (Series B: Electrical Engineering, Automation and Computer Sciences). DOI: 10.21279/1454-864X-22-11-003.
6. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S. etc. Application of fuzzy controllers in automatic ship motion control systems. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 13, No. 4, August 2023, pp. 3948-3957. ISSN: 2088-8708. DOI: 10.11591/ijece.v13i4. P.394-395.
7. Holikov V.A., Naleva H.V., Mazur O.M., Onishchenko O.A. Nechitkii rehu-liator avtosterna maloho bezpilotnoho morskoho sudna. Materialy naukovotekhnichnoi konferentsii «Morskyi ta richkovyi flot: ekspluatatsiia i remont», 20.03.2024 – 21.03.2024. – S. 11-15. – Odesa: NU «OMA», 2024. – 306 p.
8. Naleva H.V., Onishchenko O.A. Sproshchena matematychna model asynkhronnoho elektrorushyia morskykh bezpilotnykh suden. KhIII mizhnarodna naukovotekhnichna konferentsiia «Sudnova elektroinzheneriia, elektronika i avtomatyka» (SEIEA-2023), 22-23 lystopada 2023 – P. 133-138. <http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/SEIEA-2023.22.11.23.pdf>.
9. Mazur O.M., Yarym D.M., Onyshchenko O.A. Analiz tendentsii rozvytku system upravlinnia morskymy bezpilotnymy sudnamy. Naukovoteoretychna konferentsiia «Sudnovodinnia, morsky perevezennia ta tekhnolohiiI» NST-2023. 16-17 lystopada 2023 – P. 111-115. – Odesa: NU «OMA».
10. Onishchenko O., Melnyk O., Onyshchenko S., etc. Development of simplified mathematical models of asynchronous electric motor systems for multipurpose unmanned vessels. The 1st Trunojoyo Madura International Conference of Science and echnology, 29 November 2023, Indonesia. – P. 456-460. https://lppm.trunojoyo.ac.id/rushmore_event/1st-tmic-trunojoyo-madura-international-conf/ ; <https://tmic.ptti.info/#topic>.

Стаття надійшла до редакції 12.04.2024

Посилання на статтю: Волянський С.М., Галаган С.М., Мазур О.М., Налева Г.В., Корбан В.Х., Яременко В.А., Онищенко О.А. Нечіткі системи управління електро-механічними системами малих безпілотних морських суден // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2024. № 3 (74). С. 68-85. DOI 10.47049/2226-1893-2024- 3-68-85.

Article received 12.04.2024

Reference a journal artic: Volyansky S., Halahan S., Mazur O., Naleva H., Korban V., Yaremenko V., Onishchenko O. Fuzzy electromechanical control systems small marine unmanned vessels // *Herald of the Odessa national maritime university*: Coll. scient. works, 2024. № 3 (74). P. 68-85. DOI 10.47049/2226-1893-2024-3-68-85.