

УДК 62-83:629.584

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ РІЗНИХ ТИПІВ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОРУХОМ СПЕЦІАЛЬНИХ ПЛАВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ

Я. Б. Волянська, С. М. Волянський

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна. E-mail: yanavolyanskaya@yandex.ru

Проведений огляд сучасних систем керування електрорухом спеціальних плавальних засобів і аналіз різних типів регуляторів, які використовуються в таких системах, показали, що сьогодні спостерігається зміна вимог щодо керування системами електроруху у бік підвищення їх точності та ефективності. Відмічено, що для об'єктів морської робототехніки, які виконують складні операції поблизу перешкод або інших об'єктів, найбільш доцільно застосовувати системи з адаптивним і нечітким керуванням, і відповідні регулятори. Виявлено, що застосування адаптивного керування та законів нечіткої логіки дає змогу досягнути покращення динамічних характеристик системи і, як наслідок, підвищити точність керування об'єктом.

Ключові слова: адаптивність, електрорух, регулятор, точність керування, нечітка логіка.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ РАЗНЫХ ТИПОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕМ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПЛАВАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Я. Б. Волянская, С. М. Волянский

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

просп. Героев Украины, 9, г. Николаев, 54025, Украина. E-mail: yanavolyanskaya@yandex.ru

Проведенные обзор современных систем управления электродвижением специальных плавательных средств и анализ различных типов регуляторов, которые используются в таких системах, показали, что сегодня наблюдается изменение требований по управлению системами электродвижения в сторону повышения их точности и эффективности. Отмечено, что для объектов морской робототехники, которые выполняют сложные операции вблизи препятствий или других объектов, наиболее целесообразно применять системы с адаптивным и нечетким управлением, и соответствующие регуляторы. Виявлено, что применение адаптивного управления и законов нечеткой логики позволяет добиться улучшения динамических характеристик системы и, как следствие, повысить точность управления объектом.

Ключевые слова: адаптивность, электродвижение, регулятор, точность управления, нечеткая логика.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Сьогодні спостерігається, з одного боку, значне зниження масштабності морських боїв за участю десятків або сотень бойових кораблів, як це було в минулі століття. А, з другого боку, збільшення об'ємів науково-дослідних, аварійно-рятувальних робіт, необхідність вирішення актуальних питань з екологічної безпеки та охорони довкілля на воді, проведення антитерористичних заходів. Саме тому більшість морських держав, в тому числі і Україна, віддають перевагу універсальним плавальним засобам, які дозволяють одночасно вирішувати різноманітні бойові та мирні задачі. Саме до таких засобів відносяться і спеціальні плавальні засоби (СПЗ), в тому числі і безпілотні, які поділяються на надводні та підводні, телекеровані та автономні. Подібні спеціальні плавальні засоби існують у вигляді проектних і експериментальних розробок ВМФ США, Франції, Ізраїлю, Росії, Великобританії [1]. Основою таких СПЗ є гвинтокермова система електроруху яка може бути побудована на основі асинхронних трифазних двигунів, розрахованих на підвищену частоту живлення; вентильно-реактивних електродвигунів; вентильних безконтактних електродвигунів із застосуванням високоерцiovних магнітів [2].

До систем керування електрорухом спеціальних плавальних засобів (СК ЕР СПЗ) висуваються вимоги щодо підвищення точності за рахунок автоматизації [3, 4]. З підвищенням швидкості руху, маневрених характеристик, вимог до точності керування й продуктивності виконуваних робіт актуальності

набуває задача удосконалення таких систем шляхом розробки нових алгоритмів керування.

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу різних типів регуляторів, які використовуються в системах керування електрорухом спеціальних плавальних засобів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Сьогодні в науці та техніці особлива увага приділяється підвищенню якості керування систем керування, що сприяє зменшенню часу й ресурсів для виконання поставлених задач. Для цього використовують відомі основні методи вирішення задач керування об'єктами:

– методи комбінованого керування, в яких реалізуються два принципи керування – керування по збуренню та керування по відхиленню (зворотному зв'язку). Мають обмеженість при параметричних невизначеностях об'єкта;

– методи зворотних задач динаміки – використовуються для програмного керування об'єктами, що рухаються по заданій траєкторії;

– методи інваріантного керування, засновані на теорії інваріантності;

– методи компенсації збурень або компенсаційні методи, в яких після завершення перехідного процесу керування величина та помилка системи не залежать від цього збурення [5].

За результатами огляду методів керування можна зробити наступні висновки:

а) не існує універсального методу для розв'язання задачі керування об'єктом в умовах невизначеності збурень;

б) найбільш перспективними є методи, які використовують мінімальну апріорну інформацію;

в) якість методу керування в умовах невизначеності визначається якістю вирішення задачі оцінювання збурень.

Компенсаційне керування є перспективним, оскільки:

– реалізується за багатоконтурною схемою з можливістю поділу контурів за програмними цілями керування: зовнішній реалізує критерій стабілізації, внутрішні – критерії компенсації або зменшення впливів збурень;

– при розподілі цілей по контурах керування зменшується обсяг синтезу та аналізу системи керування;

– за наявною поточною інформацією про збурення можливе паралельне вирішення задач контролю і діагностування;

– системи з компенсацією збурень можуть наближатися за якістю до систем з повною інваріантністю.

Загальноприйнятий порядок синтезу систем керування полягає в наступному:

а) задається математична модель об'єкта (на практиці це зазвичай модель, отримана на основі експериментальної перехідної характеристики об'єкта);

б) приймається критерій оптимальності системи керування;

в) по моделі об'єкта визначаються структура та числові значення параметрів алгоритму функціонування регулятора, які задовольняють прийнятим критеріям оптимальності [6].

Як правило, в системах керування електродвигунами спеціальних плавальних засобів застосовують типові регулятори (інтегральні, пропорційні, пропорційно-диференційні, пропорційно-інтегральні та пропорційно-інтегрально-диференційні регулятори (I, П, ПД, ПІ і ПІД-регулятори відповідно), регулятори зі змінною структурою, робастні, адаптивні (самоналагоджувальні) та оптимальні регулятори.

Інтегральні або І-регулятори найчастіше використовуються у випадках, коли необхідно виключити статичну або інші помилки. Пропорційний (безінерційний), або П-регулятор є найбільш простим як за схемою реалізацією, так і за математичним описом. Він не спотворює форму задавального сигналу. Його застосування призводить до зниження статичної помилки в замкнутій системі регулювання. До недоліків використання П-регуляторів можна віднести наявність усіх видів помилок керування, а також зниження стійкості системи регулювання при збільшенні коефіцієнта передачі регулятора K . Пропорційно-диференційний або ПД-регулятор забезпечує підвищення точності та стійкості роботи автоматичної системи. Застосування ПІ-регулятора робить систему керування не тільки астатичною, але й підвищує її стійкість у порівнянні з І-регулятором. Регулятори даного типу широко застосовуються в системах підлеглого керування.

Якщо вихідна змінна u регулятора R описується виразом

$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt},$$

де e – сигнал розузгодження (помилка); t – час; T_i, T_d – стала інтеграції і стала диференціювання відповідно, то такий регулятор називають ПІД-регулятором.

ПІД-регулятор відноситься до найбільш поширеного типу регуляторів. Близько 90–95 % регуляторів [7], які знаходяться сьогодні в експлуатації, використовують ПІД-алгоритми. Причинами такої високої популярності є простота побудови, функціонування й промислового використання, придатність для вирішення більшості практичних задач і низька вартість.

ПІД-регулятор і його окремі випадки є теоретичними ідеалізаціями реальних регуляторів, тому для їх практичного втілення необхідно враховувати обмеження, які накладаються реальними умовами застосування й технічної реалізації.

Крім того, наявність у ПІД-регуляторах тільки трьох регульованих параметрів (K, T_i, T_d) у ряді випадків виявляється недостатньою для отримання заданої якості регулювання, особливо для систем зі значною транспортною затримкою та для систем, в яких потрібні одночасно висока якість стеження за заданою величиною та висока якість послаблення зовнішніх збурень (наприклад, функціонування спеціального плавального засобу в умовах морського хвилювання).

Існують методи зведення задач керування системами в умовах невизначеності до детермінованого керування [8]. За допомогою детермінованого підходу будуються регулятори, що забезпечують стійку поведінку динамічних систем при наявності невизначеності в параметрах математичних моделей, що викликана недосконалістю моделей (неточність параметрів) або зовнішніми збуреннями (невизначеність входів).

Робастні алгоритми можуть бути набагато складнішими за алгоритми адаптивного керування й тому адаптивний підхід до синтезу систем керування об'єктами з невизначеністю слід розглядати як альтернативний робастному. Методи адаптивного керування вивчалися у багатьох роботах. Найзагальніші результати в цій області, як зазначається в [9], отримані для стаціонарних систем, оптимізуються на нескінченному інтервалі. Однак поширена на практиці задача адаптивного керування динамічними спеціальними плавальними засобами з невизначеністю досліджена не достатньо повно.

Ще одним перспективним напрямом для використання в СК ЕР СПЗ є застосування методів нечіткої логіки (fuzzy logic) та штучних нейронних мереж. Нечітка логіка в регуляторах використовується переважно двома шляхами: побудовою самого регулятора та організацією налаштування коефіцієнтів регулятора [10]. Обидва шляхи можуть використовуватися в регуляторі одночасно. Одна з найбільш

поширених структур нечіткого регулятора показана на рис. 1.

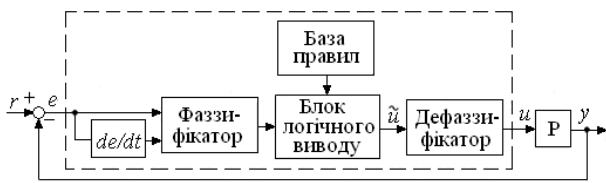


Рисунок 1 – Структура нечіткого регулятора

На вхід регулятора надходить помилка e , яка паралельно використовується для обчислення похідної за часом de/dt . Обидві величини спочатку підлягають операції фаззифікації (перетворення у нечіткі змінні), потім отримані нечіткі змінні використовуються у блоці нечіткого логічного виводу для отримання керуючої дії на об'єкт, яка після виконання операції дефаззифікації (зворотного перетворення нечітких змінних у чіткі) надходить на вихід регулятора у вигляді керуючої дії u .

Перевагами нечітких регуляторів є висока швидкість обробки інформації, надійність функціонування, здатність вирішувати неформалізовані задачі, перепрограмованість.

Отже, для підвищення вимог до якості роботи СК ЕР СПЗ, а саме їх стійкості, надійності і розширення функціональних можливостей, необхідний пошук принципово нових шляхів удосконалення процесу керування, які повинні враховувати нелінійний і нечіткий характер об'єктів та складні взаємозв'язки в процесі їх функціонування.

На підставі проведеного огляду різних типів регуляторів, які використовуються в системах керування електрорухом спеціальних плавальних засобів, виявлено, що застосування адаптивного керування та законів нечіткої логіки дозволить добитися поліпшення динамічних характеристик двигунів спеціальних плавальних засобів і, як наслідок, підвищити якість керування об'єктом. Крім того, СК ЕР СПЗ, засновані на базі нечіткої логіки, дозволяють вирішувати задачі керування з урахуванням реальної ситуації.

Для сучасного етапу розвитку науки та техніки характерна інтеграція ідей і методів. У цих випадках все частіше знаходять застосування комп'ютерні технології, основані на використанні методів штучного інтелекту (ШІ). Саме тут стає очевидним один з провідних напрямів розвитку систем керування – розвиток бортових інтелектуальних систем, що поєднують фактичні дані динамічних вимірів з сучасним математичним апаратом і високопродуктивними засобами обчислень.

Відомі системи керування рухом морського рухомого об'єкта (МРО) в маршовому режимі ґрунтуються на використанні ШІ [11, 12]. Інтелектуальна система забезпечує вимір поточних параметрів просторової орієнтації МРО, глибини руху, близькості дна акваторії і швидкості ходу. На базі цих вимірів у режимі підпорядкованого керування формуються вихідні сигнали на рушійно-кермовому комплексі

(РКК) для регулювання або стабілізації заданих параметрів руху. Інтелектуальність систем керування забезпечується реалізацією в законі керування методології нечіткої динамічної системи [13].

Структуру системи керування представлено на рис. 2. Значення вимірних датчиками параметрів руху надходять у бортову обчислювальну систему, яка орієнтована на роботу зі знаннями. За цими даними у блоці аналізу поточної ситуації вибирається модель поведінки МРО, яка характеризує необхідний маршовий режим. Відповідно до обраної моделі формується база знань, що використовує у своїй роботі інформацію з бази даних.

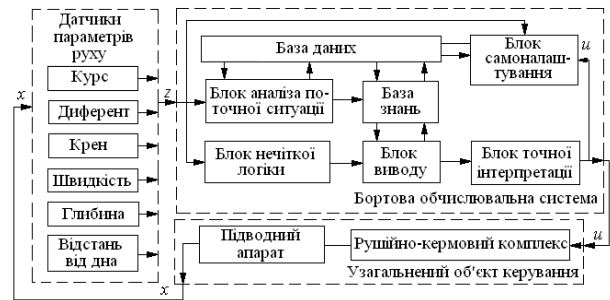


Рисунок 2 – Структурна схема інтелектуальної системи автоматичного керування рухом МРО

У блоці нечіткої оцінки кожне значення виміряного параметра перетворюється у форму, яка враховує міру його невизначеності. У блоці виведення цієї інформації і на основі поточного представлення бази знань визначаються рекомендації по керуванню рухом МРО. База знань разом із механізмом виведення утворює динамічну інформаційну систему. В блоці точної інтерпретації результати отриманих виведень перетворюються на керування.

Сигнали керування надходять до РКК, що виробляє дію на морський рухомий об'єкт. За інформацією про виміряні значення параметрів руху, сформоване керування й поточний стан бази даних у блоці самоналаштування здійснюється її корекція.

Сучасні системи керування електрорухом спеціальних плавальних засобів з використанням інтелектуальних нечітких систем (ІНС) демонструють достатню ефективність і надійність, але в той же час вони вимагають складного процесу налаштування у кожному конкретному випадку. Ефективність роботи ІНС безпосередньо залежить від того, наскільки адекватно описана досліджувана предметна область і реалізовані процедури логічного виводу інформації, чи проведено попереднє налаштування на моделі. Для цього необхідно удосконалювати математичні моделі руху апарата з урахуванням збільшених вимог до якості керування спеціальними плавальними засобами, забезпечити їх настрійку перед перенесенням на реальний об'єкт, розробити відповідні програмні та фізичні продукти для дослідження систем керування електрорухом спеціальних плавальних засобів.

Таким чином, сучасна елементна база дозволяє створювати системи керування електроприводів з великою кількістю досліджуваних сигналів, реалізо-

увати різні алгоритми їх обробки, використовувати системи керування з різними типами регуляторів. Для дослідження таких систем необхідний новий підхід до процесу проектування. Важливу роль при проектуванні електроприводів грає наявність значної кількості потужних прикладних пакетів, наприклад Matlab, які дозволяють проводити імітаційне моделювання процесів, що відбуваються в електроприводі. Але найчастіше перехід від імітації до реального приводу призводить до виявлення неточностей в роботі, пов'язаних в першу чергу з неможливістю урахування всіх можливих факторів, що впливають на привід. Одним із виходів з цієї ситуації є використання універсального засобу, що дозволяє проводити натурні експерименти з різними системами керування, налагодження систем відповідно до вимог, що пред'являються, здійснювати порівняльний аналіз двох і більше систем.

Для зведення до мінімуму впливу допущень на якість керування системою, проведення експериментів на конкретних електроприводах, що не завжди можливо, або на їх натурних імітаційних моделях. був розроблений спеціалізований моделюючий комплекс (СМК), до складу якого входить метрологічно атестований навчально-дослідницький лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1» [14].

Структурно СМК містить:

- електромеханічну частину у вигляді набору електродвигунів постійного та змінного струму з програмно керованим електромеханічним навантаженням на їхні робочі вали;
- програмну частину у складі розроблених у середовищі Matlab Simulink–моделей електроприводів, бібліотеки даних з синтезованими адаптивними регуляторами та нечіткими регуляторами;
- інтерфейс електромеханічної та програмної частин.

Проведені за допомогою СМК експериментальні дослідження СК ЕР СПЗ з синтезованими нечіткими регуляторами і адаптивними ПІД-регуляторами довели, що системи виконали програму переміщення спеціального плавального засобу за заданим алгоритмом і є стійкими.

Результати порівняння показників якості керування синтезованих СК ЕР СПЗ з адаптивними ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами представлені в табл. 1. За базовий варіант прийнята система керування з адаптивними ПІД-регуляторами.

Крім того, результати експериментальних досліджень показали, що застосування адаптивних ПІД-регуляторів в СК ЕР СПЗ у порівнянні з класичними ПІД-регуляторами дозволяє отримувати більш стабільні показники якості керування.

Розроблено рекомендації щодо використання синтезованих нечітких регуляторів і адаптивних ПІД-регуляторів у системах керування електрорухом спеціальних плавальних засобів.

Так, наприклад, наявність у СК ЕР СПЗ нелінійностей призводить до того, що класичний ПІД-регулятор з постійними коефіцієнтами не дозволяє отримати стабільні параметри якості керування в усьому діапазоні роботи об'єкта, тому у таких системах доцільно використання адаптивних ПІД-

регуляторів, що, як показали дослідження, дозволило суттєво поліпшити показники якості керування: перерегулювання зменшене з 22 % до 0 %, до 2,5 разів скорочено час перехідного процесу.

Таблиця 1 – Результати порівняння показників якості керування синтезованих СК ЕР СПЗ з адаптивними ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами

№ п/п	Показник порівняння	СК ЕР СПЗ	
		адаптивними ПІД-регуляторами	нечіткими регуляторами
1	Перерегулювання кутової швидкості обертання гребного гвинта при гальмуванні СПЗ	2,55м/с	2,9м/с
		збільшилося на 12%	
2	Точність виведення СПЗ на заданий курс	0,35м	0,25м
		збільшилася на 29%	
3	Час виконання програми переміщення СПЗ по заданому алгоритму	288с	246с
		зменшився на 15%	

При аналізі перехідних процесів, можна зробити висновок, що адаптивні ПІД-регулятори у система керування, що розглядаються, забезпечують стійке відпрацювання вхідного сигналу по різних каналах керування з досить малими помилками стеження.

Крім того, як показали проведені дослідження, використання адаптивного ПІД-регулятора та нечіткого регулятора, наприклад у СК ЕР СПЗ, дозволило знизити до 20 % помилку стеження та до чотирьох разів перерегулювання, у порівнянні з аналогічною системою з класичним ПІД-регулятором. А використання нечітких регуляторів дозволило знизити до трьох разів час перехідного процесу в порівнянні з аналогічними системами керування з адаптивними ПІД-регуляторами.

Таким чином, можна стверджувати наступне: особливості настройки адаптивного ПІД-регулятора дозволяють використовувати його за наявності достовірних функцій зміни внутрішніх збурюючих дій. Але в той же час, дуже складно враховувати набігаючий на спеціальний плавальний засіб потік води, що нелінійно змінюється, нелінійний момент гребного гвинта і т. д. За наявності достовірного спостерігача та відповідних баз правил цих недоліків позбавлена система керування з нечіткими регуляторами.

1. ВИСНОВКИ. 1. На підставі проведеного аналізу сучасних систем керування електрорухом спеціальних плавальних засобів можна відмітити, що їх удосконалення відбувалося поетапно: від працюючих за «жорсткою програмою» до повністю автономних – інтелектуальних, які нині є найбільш перспективними. Останні системи є ефективними

для спеціальних плавальних об'єктів, що функціонують в умовах невизначеності. 2. Застосування методів нечіткої логіки для синтезу законів керування сучасних систем керування електрорухом, дозволяє підвищити точність, надійність і ефективність функціонування об'єктів морської робототехніки у складних умовах. 3. Проведені експериментальні дослідження за допомогою розробленого спеціалізованого моделюючого комплексу, які довели, що системи керування з синтезованими регуляторами є стійкими. Застосування синтезованих регуляторів у системах керування електрорухом спеціальних плавальних засобів в порівнянні з класичними ПД-регуляторами забезпечує чотирикратне зменшення перерегулювання, до трьох разів збільшення швидкодії системи керування. Крім того, при стабілізації всіх регульованих величин отримано зменшення статичної помилки до 20 %. 4. Розроблено рекомендації щодо використання синтезованих нечітких регуляторів і адаптивних ПД-регуляторів у системах керування електрорухом спеціальних плавальних засобів. 5. Результати роботи знайшли практичне застосування при створенні інноваційних стендів науково-навчальної лабораторії «Технічних засобів автоматизації систем контролю і керування транспортних засобів», введеної в експлуатацію в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, при проведенні морських дослідницьких випробувань нових зразків морської робототехніки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Development and Missions of Unmanned Surface Vehicles / Yan Ru-jian, Shuo Pang, Han-bing Sun Yong-jie Pang // *Journal of Marine Science and Application*. – 2010. – Vol. 9, No. 4. – pp. 451–457.
2. Двухквadrантний вентильно-индукторный электропривод / О.Я. Карпович, О.А. Онищенко, И.Н. Радимов // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – Кременчук, 2003. – № 5 (22). – С. 56–60.
3. Сравнительный анализ методов разработки систем автоматического регулирования / Г.К. Мутанов, Н.В. Шадрин, А.Н. Аринова // *Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева – Усть-Каменогорск*, 2010. – № 2. – С. 110–117.
4. Волянська Я.Б., Волянський С.М. Особливості побудови автоматичних систем керування рухом об'єктів морської робототехніки // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2016. – Вып. 23 (99). – С. 39–44.
5. Еруланова А.Е. Синтез системы автоматического управления методами расширенных частотных характеристик и компенсации динамики объекта и возмущений // *Альманах современной науки и образования*. – 2013. – № 6 (73). – С. 57–61.
6. Власов К.П. Теория автоматического управления. – Харьков: Изд-во «Гуманитарный центр», 2007. – 526 с.
7. Landau I., Lozano R., M'Saad M., Karimi A. *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications (Communications and Control Engineering)*. – Springer, 2011. – 587 p.
8. Егупов Н.Д. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления: учебник – 2-е изд. – Москва: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 с.
9. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – Москва: Наука, 2003. – 303 с.
10. Лозинський О.Ю. Критерії стійкості систем з нечіткими регуляторами // *Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика / НТУ «ХПІ»*. – 2003. – С. 510–511.
11. Зайченко Ю.П. Основи проектування інтелектуальних систем. – Київ: Видавничий дім «Слово», 2004. – 352 с.
12. Станкевич Л.А. Интеллектуальные роботы и системы управления // *Нейрокомпьютеры – разработка, применение*. – 2005. – № 8-9. – С. 54–66.
13. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д.В. Рутковская, М.В. Пилиньский, Л.В. Рутковский – Москва: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.
14. Volyanskaya Ya.B., Volyanskiy S.M. Development of specialized modeling complex to study control systems of movable maritime objects // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. – 2017. – № 1/9 (85). – С.26–33.

FEATURES OF DIFFERENT TYPES REGULATORS APPLICATION IN ELECTRICITY CONTROL SYSTEMS OF ELECTROMOTION OF THE SPECIAL SWIMMING MEANS

Ya. Volyanska, S. Volyanskiy

National University of Shipbuilding named after admiral Makarov,

prosp. Heroiv Ukrainy, 9, Mykolayiv, Ukraine, 54025. E-mail: yanavolyanskaya@yandex.ru

Purpose. To conduct comparative analysis of various types of regulators, which are used in control systems of electromotion of special swimming means. **Results.** Based on the analysis of modern control systems for electromotion of special swimming devices, it can be noted that the improvement occurred in stages: from working under a "hard program" to fully autonomous - intellectual, which are now the most promising. The latter systems are effective for special swimming objects operating in conditions of uncertainty. The application of fuzzy logic methods for the synthesis of control laws for modern electromotive control systems makes it possible to improve the accuracy, reliability and efficiency of the functioning of marine robotics objects in difficult conditions. The conducted experimental researches with the help of the developed specialized modeling complex have proved that control systems with synthesized regulators are stable. The recommendations on the use of synthesized fuzzy regulators and adaptive PID-regulators in control systems of electromotion of special swimming means have been developed. **Originality.** A specialized modeling complex, which includes metrologically certified «Test Bench SV-1» educational and research laboratory facility has been

developed. **Practical value.** The results of the work have found practical application in the creation of innovative stands for the «Technical means of automation of vehicle control systems and vehicles» scientific and training laboratory, commissioned at the National Shipbuilding University named after Admiral Makarov, during marine research tests of new models of marine robotics.

Key words: adaptability, electromotive, regulator, control accuracy, fuzzy logic.

REFERENCES

1. Yan, Ru-jian, Shuo Pang, Han-bing, Sun Yongjie Pang (2010), Development and Missions of Unmanned Surface Vehicles, *Journal of Marine Science and Application*, No. 4. – pp. 451–457. [in English].
2. Karpovich, O.YA., Onishchenko, O.A., Radimov, I.N. (2003), “Dvuhkvadrantnyj ventil'no-induktornyj ehlektroprivod” [Two-quadrant valve-inductor electric drive], *Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu*, № 5 (22). – pp. 56–60. [in Russian].
3. Mutanov, G.K., Shadrin, N.V., Arinova, A.N. (2010), “Sravnitel'nyj analiz metodov razrabotki sistem avtomaticheskogo regulirovaniya” [Comparative analysis of methods for automatic control systems developing], *Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva, Ust'-Kamenogorsk*, №2. – pp. 110–117. [in Russian].
4. Volyans'ka, YA.B., Volyans'kij, S.M. (2016), “Osoblivosti pobudovi avtomatichnih sistem keruvannya ruhom ob'ektiv mors'koï robototekhniki” [Features of construction of automatic control systems by motion of objects of marine robotics] *Ehlektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy*, № 23 (99). – pp. 39–44. [in Ukrainian].
5. Erulanova, A.E. (2013), “Sintez sistemy avtomaticheskogo upravleniya metodami rasshirenyh chastotnyh harakteristik i kompensacii dinamiki ob'ekta i vozmushchenij” [Synthesis of automatic control system by methods of extended frequency characteristics and compensation of object dynamics and perturbations] *Al'manah sovremennoj nauki i obrazovaniya*. № 6 (73). – pp. 57–61. [in Russian].
6. Vlasov, K.P. (2007), “Teoriya avtomaticheskogo upravleniya” [The theory of automatic control], *Izd-vo «Gumanitarnyj centr»*, Harkiv [in Russian].
7. Landau, I., Lozano, R., M'Saad, M., Karimi, A. (2011), *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications, Communications and Control Engineering*, Springer, 587 p. [in English].
8. Egupov, N.D. (2002), “Metody robastnogo, nejronechetkogo i adaptivnogo upravleniya: uchebnik” [Methods of robust, neuroneutical and adaptive control], *Izd-vo MGTU im. Baumana, Moskva* [in Russian].
9. Polyak, B.T. Shcherbakov, P.S. (2003), “Robastnaya ustojchivost' i upravlenie” [Robust Sustainability and Management], *Nauka, Moskva*. [in Russian].
10. Lozins'kij, O.Yu. (2003), “Kriterii stijkosti sistem z nechitkimi regulyatorami” [Criteria for the stability of systems with fuzzy controllers], *Problemy avtomatizirovannogo ehlektroprivoda. Teoriya i praktika: NTU «HPI»*, pp. 510–511. [in Ukrainian].
11. Zajchenko, Yu.P. (2004), “Osnovi proektuvannya intelektual'nih sistem: navchal'nyj posibnik” [Basics of designing intelligent systems], *Vidavnychij dim «Slovo», Kiiiv*. [in Ukrainian].
12. Stankevich, L.A. (2005), “Intellektual'nye roboty i sistemy upravleniya” [Intelligent robots and control systems], *Nejrokompyutery – razrabotka, primenenie*, № 8-9. – pp. 54–66. [in Russian].
13. Rutkovskaya, D.V., Pilin'skij, M.V., Rutkovskij, L.V. (2004), “Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy” [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems], *Goryachaya liniya-Telekom, Moskva* [in Russian].
14. Volyanskaya, Ya.B., Volyanskiy, S.M. (2017), Development of specialized modeling complex to study control systems of movable maritime objects. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. № 1/9 (85). pp. 26–33. [in English].

Стаття надійшла 11.05.2017.