

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Волянська Яна Богданівна



УДК 629.12:629.56+681.5:656.612.8

**МЕТОДОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ЕЛЕКТРОРУШІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ БАГАТОЦІЛЬОВИХ
АВТОНОМНИХ ПЛАВАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

05 – технічні науки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Військовій академії (м. Одеса) Міністерства оборони України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Онищенко Олег Анатолійович,
Національний університет "Одеська морська
Академія" Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри технічної експлуатації флоту.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мачалін Ігор Олексійович,
Національний авіаційний університет Міністерства
освіти і науки України, декан факультету
аеронавігації, електроніки та телекомунікацій;

доктор технічних наук, професор
Фомін Олексій Вікторович,
Державний університет інфраструктури та
технологій Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри вагонів та вагонного
господарства;

доктор технічних наук, професор
Яровенко Володимир Олексійович,
Одеський національний морський університет,
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри експлуатації суднового
електрообладнання та засобів автоматики.

Захист дисертації відбудеться «23» квітня 2021 року об 11-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.110.01 у Державному університеті інфраструктури та технологій за адресою: 04071, м. Київ, вул. Кирилівська, 9, ауд. 208.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного університету інфраструктури та технологій за адресою: 04211, м. Київ, пр. Героїв Сталінграда, 2.

Автореферат розісланий «18» березня 2021 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.110.01,
доктор філософії



О. М. Коломієць

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розширення масштабів комерційних, науково-дослідних, аварійно-рятувальних і пошукових робіт, спеціальних морських операцій, вирішення актуальних проблем екологічної безпеки, охорони та моніторингу водного середовища, проведення різноманітних антитерористичних і попереджувальних заходів, визначаються суттєвим зростанням потреб України у спеціальних засобах водного транспорту – об'єктах морської робототехніки, зокрема, малогабаритних (дедвейтом до 500 кг) із радіусом автономної дії до 10 км, безпілотних автономних плавальних апаратах (АПА). Апарати такого типу дуже затребувані з боку державних інституцій – Міністерства оборони України, Державної служби України з надзвичайних ситуацій, НАН України, а також комерційними структурами. Саме цей запит практики вимагає суттєвого збільшення парку, типів, номенклатури та комплексного використання автономних малогабаритних безпілотних морських рухомих об'єктів, у тому числі багатоцільового призначення.

Важливою складовою реалізації «Морської стратегії України – 2035» є використання в українських територіальних водах сучасних багатоцільових АПА, призначених для вирішення різноманітних і спеціальних задач. При цьому можливостей конверсії і реновації існуючих цивільних суден не існує, а проектування і побудова «морських безпілотників» майже не підтримуються на державному рівні. Сьогодні більшість АПА, призначених для цивільного застосування, закупляється за кордоном, а створення АПА для вітчизняного ВМФ тільки започатковується. Вирішення цієї проблеми потребує суттєвих матеріально-часових і наукових ресурсів, використання закритих технологій і здійснено тільки за умови екстенсивного фінансування окремих, поки що попередніх, пошукових, напрямів наукових досліджень.

Багатоцільові засоби водного транспорту створюють з метою універсалізації їх застосування у різних обставинах. Такі засоби вирішують нетипові завдання, коли є нестача часу на проведення спеціальних операцій, у ситуаціях, що унеможливають застосування вузькоспеціалізованих засобів. Багатоцільові АПА пристосують для здійснення різноманітних технологічних функцій, які зазвичай виконуються декількома вузькоспеціалізованими апаратами. У порівнянні із багатоцільовими, вузькоспеціалізовані засоби більш ефективні, але у сучасних політико-економічних умовах Україна не може у короткі терміни будувати вузькоспеціалізовані судна і, зокрема, АПА.

На існуючому рівні розвитку науки і технологій України, проблема забезпечення її ефективно експлуатованими АПА обмежена науковим *протиріччям*: гарантоване виконання багатоцільовими АПА основного технологічного завдання неможливе при одночасній підтримці високої енергетичної ефективності, керованості, стабілізації режимів локальних систем, екологічності, безпечності і універсальності експлуатації, мінімізації собівартості, розширених функціональних можливостей, конструктивної спрощеності, швидкого налагодження виробництва. Слід підкреслити, що підвищення загальної ефективності експлуатації багатоцільових АПА є актуальним і проблемним комплексним науковим завданням, пов'язаним із:

– побудовою експлуатаційно-ефективних електрорушійних комплексів

(ЕРК) із обранням типу їх рушіїв і систем перетворення енергії;

- визначенням структури систем стабілізації і керування ЕРК із мінімальною апаратною надмірністю, за принципами «компромісного» (у залежності від цільового технологічного завдання і призначення апарата) обрання елементів комплексу;

- забезпеченням керованості із одночасним розширенням функціональних можливостей ЕРК, обґрунтуванням матеріально-часових витрат, використанням наявної матеріально-технічної бази комплектуючих.

Означена наукова проблема ускладнена тому, що недостатньо формалізована, що існує різноманіття принципів побудови основних елементів багатоцільових АПА (рушійних і енергетичних установок, пропульсивних комплексів, систем стабілізації руху і інших систем), що є особливості забезпечення багатоцільових АПА технічним обслуговуванням і ремонтом (ТО і Р).

Необхідно відзначити, що вирішення розв'язуваної у дисертації наукової проблеми полягає у необхідності підвищення загальної ефективності експлуатації багатоцільових АПА та безпосередньо пов'язане із процесами проектування і визначенням конфігурацій ЕРК, із забезпеченням їх якісним технічним обслуговуванням і ремонтом, залежить від головних завдань, призначених для виконання АПА. Саме це й обумовлює склад ЕРК та інших технічних систем багатоцільових АПА. Визначенням напрямів вирішення аналогічних проблем та розробці методів підвищення ефективності експлуатації АПА, їх систем керування і стабілізації режимів, у тому числі – ЕРК, активно займаються українські та зарубіжні вчені: М. Д. Агеев, О. М. Трунов, В. С. Блінцов, В. В. Будашко, Д. А. Юхимец, І. В. Тихонов, В. Ф. Филаретов, Л. Л. Вагущенко, В. А. Голюков, А. Д. Піпченко, А. С. Мальцев, Э. Кавалло, Р. Нерман, А. Levin, N. Yossein, Guo Jen-Hwa, J. Geisbert, Z. Lui, N. Hossenta, V. Kuhn та інші. Узагальнений аналіз їх публікацій дозволяє стверджувати, що удосконалення методології підвищення ефективності експлуатації багатоцільових АПА і їх ЕРК, яке засноване на попередньому науковому обґрунтуванні і визначенні необхідних тактико-технічних характеристик (ТТХ) ЕРК таких АПА, на удосконаленні концепції їх проектування і синтезу конструкції, побудови та забезпеченні подальшого ефективного технічного обслуговування та ремонту, є актуальною науковою проблемою, у тому числі для функціонування ВМС України і її цивільного флоту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження спрямоване на реалізацію Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України № 430-р від 30.05.2018 р.), Морської доктрини України на період до 2035 року (Постанова № 1307 Верховної Ради України від 07.10.2009 року, зі змінами від 18.12.2018 року, № 1108), відповідає напрямкам, визначеним у «Тематиці наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок МОН України» (Наказ МОН України № 1466 від 28.12.2018 р.). Зокрема, дисертаційна робота виконувалась у межах:

- планів дослідницьких робіт наукового семінару «Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок» Вченої Ради Інституту електродинаміки Національної академії наук України з проблеми «Наукові основи електроенергетики» у Військовій академії (м. Одеса);

- фінансованої на конкурсній основі науково-дослідної і дослідно-

конструкторської роботи, тематика якої схвалена Науковою Радою МОН України (Секція 7 – «Енергетика та енергоефективність»), а саме роботи «Енергетична установка, пропульсивний комплекс і система управління автономного плавального апарата подвійного призначення» (ДР № 0120U102577);

– науково-дослідних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова «Теоретичні основи створення й ефективного використання підводних роботизованих комплексів для дослідження та освоєння Азово-Чорноморського басейну» (ДР № 0105U001765) і «Розробка теоретичних основ групового керування автономними підводними апаратами» (ДР № 0113U000243).

У всіх перелічених науково-дослідних роботах здобувач прийняла участь як виконавець окремих етапів досліджень, із підготовкою відповідних розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії, методології та технологій підвищення ефективності експлуатації електрорушійних комплексів багатоцільових АПА.

Головне наукове завдання дослідження спрямоване на забезпечення ефективності процесів керування, синтезу конструкцій та експлуатації ЕРК багатоцільових АПА, яке реалізується на основі розробки і практичного використання запропонованих авторських методів побудови програмно-апаратної частини із мінімальною апаратною надмірністю, використанням модульності у конструктивних рішеннях, оптимізації процесів у локальних системах стабілізації, організації технічного обслуговування і ремонту багатоцільових АПА.

Для досягнення цієї мети і вирішення головного завдання сформульовані наступні наукові задачі.

1. Упорядкувати термінологію, можливості створення та вимоги до ЕРК АПА, визначити науково-технічні проблеми розвитку систем керування багатоцільових АПА та задачі їх автоматизації. Визначити основні принципи конструкційної побудови ЕРК, характеристики, можливості використання його елементів при передачі потужності від джерел енергії до рушіїв у різних експлуатаційних умовах.

2. Визначити особливості побудови систем керування і енергоефективні режими роботи ЕРК АПА з оцінкою можливостей зниження втрат потужності, уточнити і верифікувати параметри моделей систем електроруху АПА.

3. Визначити, як перспективний напрям підвищення ефективності ЕРК АПА, можливості конструкційної модернізації його двигунів, оцінити можливості енергетичної оптимізації використанням методів регулювання напруги.

4. Розробити для багатоцільових АПА, на основі принципу мінімізації апаратної частини елементів передачі енергії із забезпеченням головних функціональних можливостей, математичні моделі і принципи побудови ЕРК.

5. Розробити і удосконалити методи структурно-параметричної ідентифікації вітро-хвильових навантажень на корпус суден, і на їх основі синтезувати частково-інваріантні до збурень енергоефективні системи стабілізації курсу.

6. Розробити метод відбору ремонтних організацій для підвищення ефективності технічного обслуговування і ремонту багатоцільових АПА.

7. Розробити метод підтримки прийняття «компромісних рішень» при

синтезі ЕРК і складних технічних систем різного призначення. Розробити і удосконалити методи обрання елементів ЕРК з передбаченою варіативністю експлуатаційної ефективності з одночасною зміною інших характеристик (вартості, маси, автономності тощо).

8. Розробити спеціалізований моделюючий комплекс (СМК) для дослідження ефективності роботи ЕРК в стаціонарних і динамічних режимах, реалізувати та дослідити ЕРК при горизонтальному прямолінійному русі АПА з синтезованими регуляторами, оцінити ефективність отриманих законів керування. Провести моделювання просторового руху АПА і експериментально дослідити дію регуляторів ЕРК; експериментально дослідити системи енергозберігаючого керування вертикальним рухом АПА.

Об'єктом досліджень є процеси енергозберігаючого керування, перетворення та передачі енергії в електрорушійних комплексах багатоцільових автономних плавальних апаратів; процеси і процедури обрання елементів цих комплексів, підтримки прийняття організаційно-технічних рішень у процедурах технічного обслуговування і ремонту.

Предметом досліджень є системи та апаратні засоби побудови ефективно експлуатованих електрорушійних комплексів і систем керування багатоцільових автономних плавальних апаратів.

Методи досліджень. У роботі поєднані теоретичні, чисельні та експериментальні методи дослідження. Теоретичні методи розроблялися у випадках, коли доводилося стикатися з абсолютно новими проблемами, що не досліджувалися раніше, або якщо застосування відомих методів виявлялося не раціональним для вирішуваних завдань. За допомогою теоретичних розробок створені розрахункові методи для ЕРК АПА і система підтримки прийняття рішень, що реалізує запропоновані методи організації процесів ремонту і технічного обслуговування, обрання конструктивних елементів ЕРК. Експериментальні методи використовувалися для верифікації отриманих результатів і математичних моделей. При цьому експерименти проводилися на розробленій авторкою фізичній моделі – багатофункціональному лабораторному комплексі зі змінною структурою, що дозволило максимально наблизити теоретичну роботу до вирішення практичних задач. Експериментальні дані і теоретичні результати зіставлені, що підтвердило достовірність результатів, які одержані за допомогою створених математичних моделей і аналітичних викладень.

При вирішенні поставлених у дисертації задач використовувалися такі методи і теорії: числові методи розв'язання систем нелінійних диференційних рівнянь, методи математичного моделювання для дослідження динаміки горизонтального прямолінійного руху АПА з використанням сучасних ліцензованих пакетів прикладних програм *Matlab*; методи теорії електропривода та гідродинаміки обертового руху у рідині для синтезу механічних характеристик баророзвантаженого асинхронного двигуна ЕРК, як об'єкта керування; методи теорії автоматичного керування і методи побудови адаптивних ПД-регуляторів для синтезу законів керування ЕРК при горизонтальному прямолінійному русі АПА; метод стендових випробувань електромеханічних об'єктів за допомогою метрологічно атестованого навчально-дослідницького лабораторного засобу

«Стенд випробувальний СВ-1» для перевірки ефективності функціонування синтезованих регуляторів і АСК ЕРК АПА у статичних і динамічних режимах; методи імітаційного моделювання ЕРК для перевірки адекватності удосконалених і розроблених математичних моделей ЕРК, що працюють у різних режимах керування, реальним фізичним процесам.

У роботі переслідується вирішення проблеми підвищення ефективності функціонування ЕРК багатоцільових АПА, при умовах екологічності, безпечної експлуатації і гарантованого виконання основного технологічного завдання, яке ускладнено необхідністю одночасного забезпечення універсальності застосування, конструктивної спрощеності, мінімальної собівартості і швидкості налагодження виробництва АПА. Тому у дисертації висунута гіпотеза – вирішення означеної проблеми підвищення ефективності функціонування багатоцільових АПА, у першу чергу, пов'язане із конфігурацією їх ЕРК, організацією процесів проектування і подальшого обслуговування і залежить від конкретних вимог до виконання головних задач, призначених для вирішення АПА, що визначає склад його ЕРК і інших технічних систем.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше отримано метод побудови енергоефективної системи стабілізації курсу, який відрізняється введенням властивостей часткової інваріантності до збурень, що дозволяє підвищити загальну ефективність експлуатації: зменшити витрати енергії, спростити технічну реалізацію, забезпечити збільшення часу автономної дії АПА.

2. Удосконалено метод ідентифікації параметрів нелінійної математичної моделі Номото систем керування ЕРК морських суден, який відрізняється використанням і обробкою результатів маневрених експериментів, що дозволяє енергетично ефективно експлуатувати судна у режимах стабілізації курсу.

3. Удосконалено метод підтримки прийняття рішень при забезпеченні технічним обслуговуванням і ремонтом багатоцільових засобів водного транспорту, який, на відміну від відомих, ґрунтується на удосконаленій процедурі розрахунку різнорідних інтегрованих показників TO і P і заснований на адитивному використанні методів кваліметрії, експертних оцінок і лінгвістики, що дозволяє підвищити ефективність TO і P багатоцільових засобів водного транспорту.

4. Удосконалено процедуру синтезу ЕРК на основі безконтактного двигуна, яка відрізняється обґрунтованим виключенням із комплексу окремих елементів за принципом «мінімальної апаратної надмірності», що дозволяє підвищити надійність функціонування і зменшити вартість апаратної частини ЕРК без суттєвого погіршення основних регульовальних і енергетичних характеристик.

5. Удосконалено метод підтримки прийняття рішень при визначенні складових елементів ЕРК, який відрізняється ітераційним використанням інтегрованих показників для комбінацій елементів комплексів, що дозволяє підвищити ефективність експлуатації ЕРК знаходженням варіантів, непокрашуваних за кількома критеріями одночасно.

6. Отримав подальший розвиток метод аналогій для геометрично подібних двигунів ЕРК, який відрізняється доведенням можливостей застосування багатополюсних двигунів на підвищеній частоті джерела живлення без суттєвого

їх переконструювання, що дозволяє досягти суттєвого запасу потужності і моменту при забезпеченні різних експлуатаційних режимів АПА.

7. Отримав подальший розвиток метод оцінки енергоефективності різних конструктивних переробок однакових за висотою вісі обертання двигунів ЕРК, який відрізняється багатofакторним інтегрованим їх порівнянням, що дозволяє визначати результуючі експлуатаційні характеристики ЕРК АПА.

Практичне значення одержаних результатів укладено у їх відповідності до вирішення задач Морської доктрини і планів проведення окремих НДР і НДДКР у сфері досліджень і створення морської робототехніки в Україні. Зокрема, особисто отримані наукові результати здобувачем втілені у практичні розробки: у структурні схеми, алгоритми функціонування і конструкції електрорушіїв; у вимірювальні прилади і програмну реалізацію адаптивних регуляторів, які використовуються при створенні високоточних систем керування ЕРК АПА, у рекомендаціях щодо умов і області застосування синтезованих адаптивних регуляторів різних технічних систем апаратів, у лабораторно-дослідницьких стендах.

Результати наукових досліджень та навчально-наукові розробки здобувача, інформаційне та програмно-апаратне забезпечення використовуються у навчальному процесі різних закладів вищої освіти України: Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), Національному університеті «Одеська морська академія», Військовій академії (м. Одеса) та інших.

Практичні результати дослідження впроваджені і використані:

– при підготовці у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова бакалаврів за спеціальністю 271 – «Річковий і морський транспорт», магістрів за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма "Експлуатація суднових автоматизованих систем», де здобувач є її розробником), аспірантів (*PhD*) за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»;

– у навчальному процесі Центра підготовки атестації плавскладу НУ «ОМА» для слухачів курсів підвищення кваліфікації суднових механіків і електромеханіків (акт впровадження від 27.05.2020 р.);

– у діяльності ПАТ СК «Укррічфлот» філії «Херсонський суднобудівний-судноремонтний завод ім. Комінтерну» (акт впровадження № 113 від 11.09.2019 р.);

– у діяльності підприємства ТОВ «СМАРТ-МЕРІТАЙМ ГРУП» Миколаївська верф (акт впровадження № 257 від 15.07.2020 р.);

– у Науковому центрі Військової академії (м. Одеса) (довідка від 27.03.2020 р.) при виконанні НДР, присвячених проблемам розвитку систем технічного забезпечення військ (сил);

– у ТОВ «Онікс» (акт впровадження від 07.02.2019 р.) при дослідному виробництві асинхронного маршового двигуна ЕРК.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримані автором особисто. У публікаціях, написаних у співавторстві, авторці належать: [1] – аналіз процесів перемикання обмотки; визначення можливостей енергозбереження; [2] – енергетично-

ефективний спосіб керування напругою; [4] – конструкція і метод метрологічної атестації моментоміру; [5] – аналіз типів енергозберігаючих електроприводів; визначення принципів побудови різнотипних регуляторів морських рухомих об'єктів; [6] – розробка каналу вимірювання споживаної потужності; [7] – удосконалення математичних моделей (ММ) різних типів електроприводів, що дозволяють оптимізувати за різними критеріями робочі процеси ЕРК; [8] – концепція побудови вимірювача частоти обертання; [9] – принцип побудови системи керування рушійно-стерновим комплексом підвищеної якості підводного апарата; експерименти; [10] – формулювання вимог до якості систем горизонтального руху об'єктів морської робототехніки, визначення параметрів ефективності функціонування їх систем керування рухом; [11] – отримання ММ для розрахунку пускових ділянок АД ЕРК; [12] – визначення параметрів регуляторів, відмінностей систем керування при застосуванні регуляторів у ЕРК спеціальних плавальних засобів; [14] – удосконалення процедури розрахунку сигналу керування, пропорційного головному збуренню; [15] – удосконалення процедур розрахунку різнорідних показників у СППР для забезпечення ТО і Р суден; [16] – уточнення СППР при визначенні можливих комбінацій елементів складних технічних систем; [17] – удосконалення і верифікація моделі просторового руху; [18] – пропонування, створення, випробування і впровадження конструкції спеціалізованого моделюючого комплексу об'єктів морської робототехніки; [19] – удосконалення рішень з побудови ЕРК плавальних апаратів з БДПС; [20] – математичний опис режимів роботи системи ТПН-АД; доведення можливості зменшення втрат потужності; [21] – удосконалення методу визначення енергетично-ефективних режимів роботи ЕРК; [22] – удосконалення методу врахування залежностей зміни насичення ланцюга намагнічування, втрат у сталі; [23] – доведення можливості підвищення енергетичних показників загальнопромислових двигунів; визначення енергетичних характеристик; [25] – пропонування МП-системи підпорядкованого керування; доведення можливості точного відтворення заданої траєкторії руху; [26] – моделювання; визначення можливостей оцінювання впливу збурень на курс; [27] – пропонування використання конструкції, кінематично не пов'язаної з ротором і нерухомою основою; [28] – пропонування використання маневрених випробувань для побудови моделі; [29] – спрощення окремих складових ММ; аналіз результатів; [30] – розробка принципової схеми спеціалізованого моделюючого комплексу; [31] – аналіз характеристик різних типів двигунів і можливостей їх застосування у підводних апаратах; синтез конструкції двигуна; [32] – синтез нечіткого регулятора вертикального маршового рушія, що дозволяє керування рухом і орієнтацією підводного апарата; [33] – обґрунтування задачі синтезу систем автоматичного керування плоским і просторовим рухом підводних апаратів при наявності течії, хитавиці, зміни параметрів водного середовища; [34] – розробка ММ і оцінки точності процесів моделювання горизонтального прямолінійного руху підводного апарата; [35] – аналіз джерел інформації; виокремлення методів вирішення задач керування спеціалізованими рухомими морськими об'єктами; [36] – обґрунтування можливостей розробки енергоефективних ЕРК; визначення особливостей функціонування електрорушіїв АПА при керуванні напругою при

незмінній частоті живлення; [38] – аналіз джерел інформації; визначення перспектив подальшого розвитку багатоцільових суден; [39] – удосконалення елементів системи підтримки прийняття «компромісних рішень» для синтезу складних систем; [40] – узагальнення і аналіз джерел інформації; визначення перспективних розробок у області створення і застосування АПА; [41] – розділи, присвячені алгоритмізації представлення і опису структури НДР; [42] – розділи, присвячені оптимізації електромеханічних систем різного призначення. Публікації [3, 13, 24, 37] виконані без співавторів.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались й обговорювались на Всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях, а саме на: XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Електроприводи змінного струму» (м. Єкатеринбург, 2007 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів» (м. Миколаїв, 2012 р., 2013 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Підводна техніка і технологія» (м. Миколаїв, 2012 р., 2016 р.); Українсько-німецькій конференції «Інформатика. Культура. Техніка» (м. Одеса, 2016 р.); науково-методичній конференції «Актуальні проблеми суднової електроенергетики, електромеханіки та радіоелектроніки» (м. Одеса, 2017 р.); науково-технічній конференції «Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2018 р.); науково-практичній конференції «*Technical sciences: history, the present time, the future, EU experience*» (м. Вроцлавек, 2019 р.); II Міжнародної науково-практичній морській конференції кафедри суднових енергетичних установок і технічної експлуатації Одеського національного морського університету (м. Одеса, 2020 р.); XX науково-технічній конференції Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (ДНДІ ВС ОВТ, м. Чернігів, 2020 р.). Також, результати роботи доповідались й обговорювались (2016–2020 р.р.) на науковому семінарі «Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок» Вченої Ради Інституту електродинаміки Національної академії наук України з проблеми «Наукові основи електроенергетики» у Військовій академії (м. Одеса), на кафедрах «Електротехніки і систем ракетно-артилерійського озброєння» і «Інженерної механіки».

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані у 42 працях (з них 4 одноосібні), у тому числі: 26 статей у фахових наукових виданнях України та інших держав (з них 9 статей, що входять до науково-метричних баз даних *Scopus* та *Web of Science* і 1 патент України на корисну модель); 15 апробаційних праць, з них одна доповідь на міжнародній конференції, що проіндексована у науково-метричній базі даних *Scopus*, одна стаття, два навчально-наукових посібника і 11 тез доповідей у збірниках матеріалів всеукраїнських і міжнародних наукових конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація містить вступ, сім розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Повний обсяг дисертації становить 371 сторінка, основний зміст викладено на 298 сторінках, 51 сторінка списку використаних джерел (262 найменування), 26 таблиць, 88 рисунків, 40 сторінок додатків (акти впровадження, довідки, протоколи атестації тощо).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі визначено запит практики і існуюча науково-технічна проблема забезпечення ефективної експлуатації електрорушійними автономних плавальних апаратів, обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами, сформульовані мета і завдання наукового дослідження, об'єкт і предмет досліджень, наведені методи досліджень, що застосовувалися для досягнення поставленої мети. Викладено новизну й практичну значущість отриманих наукових результатів, наведено дані про публікації й апробацію результатів роботи, охарактеризовано особистий внесок здобувача, подано відомості про впровадження результатів роботи.

У першому розділі проведено аналіз сфер використання, сучасного стану і типів конструкцій АПА, у тому числі – багатоцільових та їх автоматизованих систем керування (АСК) електрорушійними комплексами. Аналіз показав, що: а) у провідних країнах світу функціонують різноманітні плавальні апарати військового і цивільного призначення, які використовуються у різних морських технологіях; б) трендом розвитку сучасних морських технологій є все більш масштабні дослідження у напрямку створення автономних безпілотних морських суден, що являють собою наступну сходинку еволюції судноплавства.

Уточнено поняття «ефективна експлуатація» морського судна багатоцільового призначення при обґрунтуванні конструкції та призначення всіх систем АПА в умовах обмежень фінансів, часу, технологій, нормативно-правових та соціально-політичних чинників, прогнозу його внеску у наявний потенціал флотів, у ціну реалізації проектів, у ключові потенційні характеристики тощо.

Визначені відмінності у концептуальному підході до принципів конструювання багатоцільових АПА та їх окремих систем і загальноприйнятих при проектуванні цивільних суден. Саме ці відмінності у концепції проектування (урахування модульності конструкції, можливості швидкої заміни обладнання, можливості «одноразового» використання, універсальність), дозволяють їх ефективно застосовувати у мирний і у воєнний час. Узагальнив наведений огляд існуючих багатоцільових АПА, запропоновані конструктивні рішення, які здатні використатися у сучасних багатофункціональних морських безпілотних транспортних засобах України (спрощені конструкції багатоцільових АПА із ЕРК наведені на рис. 1).

На рис. 1 позначено: а) тип А, 1 – гребний гвинт; 2 – редуктор; 3 – баророзвантажений двигун; 4 – перетворювач напруги (перетворювачі енергії); 5 – акумулятор, система живлення; 6 – система керування (бортовий комп'ютер); 7 – навігаційні датчики; 8 – локатори бокового огляду; 9 – додаткове обладнання (ліхтарі, камери, сонари та ін.); 10 – сонячна батарея (опція); 11 – допоміжне обладнання («корисне навантаження»: додатковий акумулятор, вантаж, маніпулятори тощо); б) тип В, 1 – гребний гвинт; 2 – валопровід; 3 – редуктор; 4 – електродвигун; 5 – перетворювач енергії; 6 – акумулятор; 7 – система керування (бортовий комп'ютер); 8 – бойовий чи моніторинговий літаючий дрон; 9 – локатори бокового огляду; 10 – навігаційні датчики (лаг, *GPS*, тощо); 11 – відеокамери (уперед, догори тощо); 12 – ліхтарі; 13 – антена супутникового зв'язку; 14 – вертикальне стерно; 15 – електрорушій вертикального стерна; 16 – електрорушій горизонтального

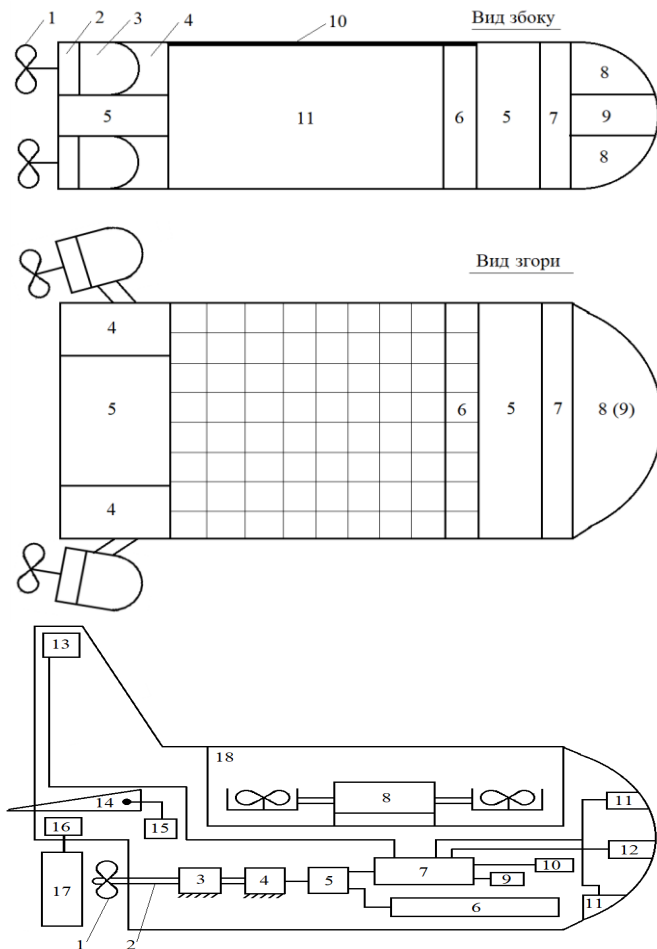


Рисунок 1 – Спрощені конструкції перспективних зразків багатоцільових АПА типів А і В

а)

б)

стерна; 17 – горизонтальне стерно; 18 – вантажний відсік.

Основною задачею при розробці АСК для багатоцільових АПА є застосування таких схемотехнічних рішень, які дозволять реалізовувати всі поставлені для виконання технологічні задачі із необхідними критеріями якості процесів керування. Виходячи зі світового тренду розвитку автономних безпілотних систем у морській галузі та різноманіття функцій і задач, які вирішуються із застосуванням морських роботів та роботизованих морських систем, безпечності мореплавства під час комерційної експлуатації *Smart Ship* або автономних суден, набуває гострої необхідності розробка методів, що враховують багатокритеріальність під час вибору пропульсивних комплексів для цих об'єктів багатоцільового водного транспорту, що і визначає актуальність дослідження.

Визначені наукові проблеми розвитку систем керування та задачі автоматизації багатоцільових АПА. Така складна, протирічна і актуальна задача вирішується тільки на основі системного підходу.

Проаналізовано стан розвитку систем підтримки прийняття рішень (СППР) у галузі проектного синтезу та дослідження складних технічних систем (СТС) багатоцільового і спеціального призначення. Таким чином, створення високоефективних АПА з суттєвим зменшенням витрат ресурсів можливо за рахунок: а) використання загального принципу «багатоцільове призначення» вже на етапах аван-проекування і побудови технічного завдання; б) обрання елементів СЕУ, пропульсивного комплексу (ПК) і елементів системи керування ЕРК АПА на основі методу «компромісу», тобто урахував, що незначне зниження вимог відносно мінімуму за одним параметром може привести до одночасного покращання інших параметрів ЕРК; в) використання частково-інваріантних до вітро-хвильових збурень принципів стабілізації курсу; г) використання принципів модульності та мінімальної апаратної надмірності для визначення елементів ЕРК, ПК і АСК у залежності від технологічного завдання; д) визначення елементів АПА для виконання спеціальних задач, наприклад, за принципом мінімальної собівартості зі збереженням функціональних можливостей (апарат-камікадзе, брандер).

У другому розділі визначені обмеження у використаних теоретичних методах. обґрунтовано тематику дисертаційного дослідження і його рамки, розроблено технологічну карту дослідження.

Визначені особливості процесів моделювання руху морських транспортних засобів у типових системах координат. Наведена система координат при стабілізації руху АПА при його русі уперед із оцінкою стійкості АПА. Запропонована зовнішня архітектура АПА, яка визначена із використанням рівнянь Майрінгена, як функції осьового положення АПА із основними параметрами (*Myring hull profile*) багатоцільового АПА (розміри корпусу, довжина с хвостової частині, кормове зміщення K , експоненціальний коефіцієнт, кормовий кут θ , максимальний діаметр корпусу і інші).

Пропонується теоретичне вирішення проблем синтезу ефективно експлуатованих систем стабілізації руху АПА за допомогою ЕРК здійснювати на основі праць Г. В. Щипанова, Н. Н. Лузіна, В. С. Кулебякіна, Б. Н. Петрова, А. Г. Івахненко, А. І. Кухтенко, П. І. Чинаєва. Ці дослідження є теоретичною основою для запропонованого синтезу енергоефективної, інваріантної до збурень, двоканальної системи стабілізації курсу АПА (розд. 5). При синтезі ЕРК АПА запропоновано використовувати оптимізацію локальних систем на основі принципів підпорядкованої набудови координат: «технічний оптимум» (*Beitrag Optimum*) і «симетричний оптимум». Аналіз загальних методів синтезу систем управління ЕРК АПА, з погляду їх методологічного забезпечення, привів до наступної алгоритмізації.

1. Обрання вихідної структури й запису моделі синтезованої системи управління електрорушіями, що складена із мінімуму функціонально необхідних елементів.

2. Запису у диференціальній формі α -системи, яка відрізняється від вихідної введеними чутливо-підсилювальними елементами, підлягаючими визначенню функціями й параметрами α_j , що знаходяться після збурювань.

3. Запису основної системи рівнянь після диференціювання α -системи за параметрами α_j , та після обліку критерію інваріантності $\frac{\partial x_i}{\partial \alpha_j} \equiv 0; i, j \in \overline{1, n}$.

Застосував до неї диференціальні оператори, виходять умови інваріантності у диференціальній формі.

4. Підставивши отримані оператори в умови інваріантності у диференціальній формі і дорівнюючи коефіцієнти при однакових ступенях x_i , отримується система рівнянь у часткових похідних щодо невідомих функцій, введених для α -системи.

5. Отримується математична модель системи уведенням у явному виді умов інваріантності у α -систему. Вводяться нелінійності й фільтри, що компенсують і є зворотними наявних у вихідній системі нелінійностей і інерційностей.

6. Будується структура системи, що описує вільний рух інваріантної системи керування електрорушіями, яка виходить шляхом взаємного виключення інерційностей і нелінійних елементів.

7. В отриману систему уводяться керування, які потрібні визначити, після чого система рівнянь приводиться до нормальної форми. Обирається раціональний

критерій (або інтегральний критерій) оптимальності, наприклад, вимоги до перерегулювання, швидкодії, ККД тощо.

8. Отримується математична модель високоякісної системи керування шляхом уведення отриманих умов оптимальності (в змісті обраного критерію) у математичну модель інваріантної системи керування електрорушійними АПА.

Математичний опис вирішення поставленої проблеми підвищення ефективності експлуатації багатоцільових АПА і, зокрема, їх ЕРК, у дисертації формалізовано виразом – записом логічної схеми алгоритму (ЛСА). Системний аналіз проблеми показав, що розв'язання головного завдання характеризується взаємозалежністю та замкнутістю процедур аналізу й синтезу ЕРК, а у загальному виді побудову ефективно-експлуатованих електрорушійних комплексів багатоцільових АПА можна формалізувати у вигляді ЛСА наступного запису:

$$S_{St} \overset{1}{\downarrow} TRGT.TMSK.p_1 \overset{1}{\uparrow} C_1.C_2 \overset{2}{\downarrow} C_3.p_2 \overset{2}{\uparrow} C_4.p_3 \overset{23}{\updownarrow} C_5.C_6.p_4 \overset{3}{\uparrow} C_7.S_{End},$$

де S_{St} , S_{End} – оператори початку й кінця ЛСА; $TRGT$ – формування мети дослідження; $TMSK$ – формування головного завдання дослідження; C_1 – вибір і розробка основних принципів побудови ЕРК багатоцільових АПА; C_2 – аналіз досліджень та проблем побудови конструкцій АПА, висвітлення основних факторів, що впливають на ефективність використання і конструкції АПА, ідентифікація параметрів ЕРК, обрання типу двигунів, систем живлення тощо; C_3 – розробка методології побудови ЕРК конкретного типу (із мінімальною апаратною надмірністю для виконання цільових задач, енергоефективних тощо); C_4 – розробка математичних моделей руху та стабілізації режимів, окремих систем управління курсом, стабілізації режимів електрорушійів тощо; C_5 – розробка методу визначення «оптимальної» конструкції елементів ЕРК, залежно від конкретних умов експлуатації чи цільового призначення АПА; C_6 – розробка методів побудови інваріантних до збурень систем стабілізації з різнорідними вхідними даними; C_7 – перевірка розроблених методів шляхом експерименту та імітаційного моделювання; p_1 – умови відповідності мети проблемі; p_2 – умови відповідності обраної технології принципам та критеріям підвищення ефективності експлуатації; p_3 – умови задоволення синтезованих моделей застосуванню при вирішенні багатоцільових завдань; p_4 – умови задоволення частковим і загальним принципам підвищення ефективності експлуатації. Також наведені функціонально-структурні схеми, що описують методологічну побудову дослідження.

У третьому розділі проведені дослідження маршових двигунів для систем електроруху багатоцільових АПА. Визначені енергоефективні режими роботи електрорушійів і показано, що при роботі маршових двигунів у зоні часткових навантажень (менших 60 % номінальних значень), які характерні для функціонування ЕРК АПА, знижується їх результуюча енергетична ефективність. З аналізу літературних джерел і характеристик баророзвантаженого асинхронного двигуна (БАД) ЕРК припущено, що при зниженні навантаження M_c з боку гвинта існує магнітний потік двигуна, коли сумарні втрати потужності зменшуються. Для цього ефекту оцінені можливості зменшення втрат потужності у ЕРК АПА.

Із розрахункових залежностей ККД і струму для БАД ЕРК,

сконструйованого на основі загальнопромислового двигуна типу 4A56A2 (побудованих при зміні напруги і різних відносних $M_c^* = M_c / M_{ном}$ статичних навантажень з урахуванням нелінійності магнітної системи), виявлені екстремуми ККД і струму статора. Саме цей ефект дозволяє побудову енергоефективних систем керування ЕРК: при 65 % номінального статичного навантаженні, мінімуму струму відповідає 80 % номінальної напруги і практично збігається з максимумом ККД, при чому споживаний струм менше номінального на 8 %, а ККД зростає майже на 5 %.

Перспективним напрямом підвищення енергетичної ефективності є конструкційне перепроектування АД для ЕРК з перетворювачами частоти. Це пояснюється тим, що при живленні АД напругою з частотою, збільшеною пропорційно числу пар полюсів, відбувається зменшення його головних розмірів. Показано, що при підвищенні частоти напруги живлення і збереженні незмінними електромагнітних навантажень, ККД і $\cos \phi$ багатополюсних переконструйованих АД перевищують аналогічні значення двополюсних серійних АД і мають суттєві запаси потужності та моменту, що вкрай необхідно для режимів екстрених маневрів АПА. Основною перевагою запропонованої модернізації АД для АПА є порівняно проста технологія, що забезпечує таку конструкційну модернізацію. Найчастіше, енергетична оптимізація АД застосовується повільним регулюванням напруги. У якості критерію оптимізації, можуть бути прийняті мінімальні втрати, мінімальний струм або мінімальна активна споживана потужність. Регульованим параметром є напруга, а у якості сигналу зворотного зв'язку використовується ковзання або кутова швидкість.

Запропонована енергетична оптимізація ЕРК – забезпечення мінімальних втрат вимагає стабілізації постійного оптимального ковзання. Це дозволяє мінімізувати втрати ΔP у системі стабілізації із зворотним зв'язком за ковзанням:

$$\Delta P_{\min} = 2 \cdot M \cdot \omega_0 \cdot [(r_1 + r_2') (r_1/x_0^2 + 1/r_0)]^{1/2},$$

де r_0, r_1, r_2', x_0 – параметри схеми заміщення АД, ω_0 – синхронна швидкість.

Комплексний аналіз розглянутих і запропонованих способів енергозбереження ЕРК здійснений за допомогою авторських дослідних стендів науково-дослідних лабораторій «Енергозбереження в електроприводі» та «Технічні засоби автоматизації систем контролю і керування транспортних засобів».

У четвертому розділі проведено розробку та дослідження безконтактного вентильного електропривода з мінімальною апаратною надмірністю для електрорушії багатоцільового АПА. Синтезовано математичну модель електрорушії АПА; розроблено електрорушій із мінімальною апаратною надмірністю: пропонується просте технічне рішення на основі безконтактного двигуна постійного струму (БДПС), яке виключає застосування проміжних обчислень координат, дорогого і складного енкодера (рис. 2).

Таке рішення електрорушії використовує у якості енкодера (ДПР) три геометрично зміщених датчики Холла і спеціалізований, недорогий, керуючий мікроконтролер типу МС33035. Основна функція мікроконтролера – сформувати за командами ДПР сигнали розподілу імпульсів (PI) на ключі VT1, ..., VT6 інвертора. Ще одна відмінна риса запропонованого рішення – особливість реалізації негатив-

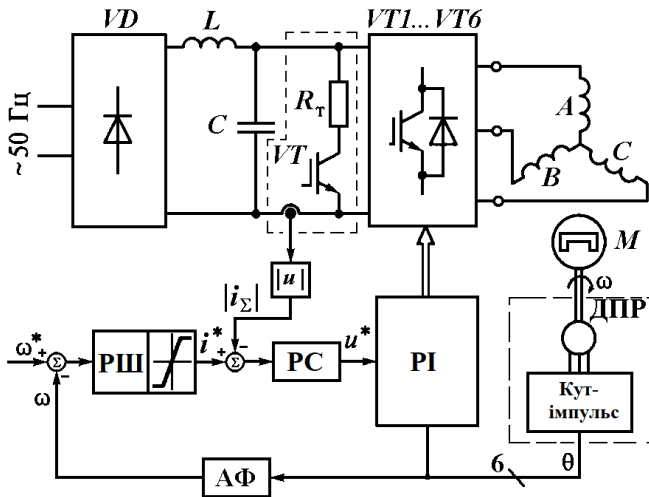


Рисунок 2 – Спрощена функціональна схема ЕРК для АПА на основі БДПС із Холлівським ДПР

структурно-функціональна схема ЕРК АПА, побудована на основі схеми, наведеної на рис. 2. Система регулювання – двоконтурна, з підпорядкованим регулюванням координат.

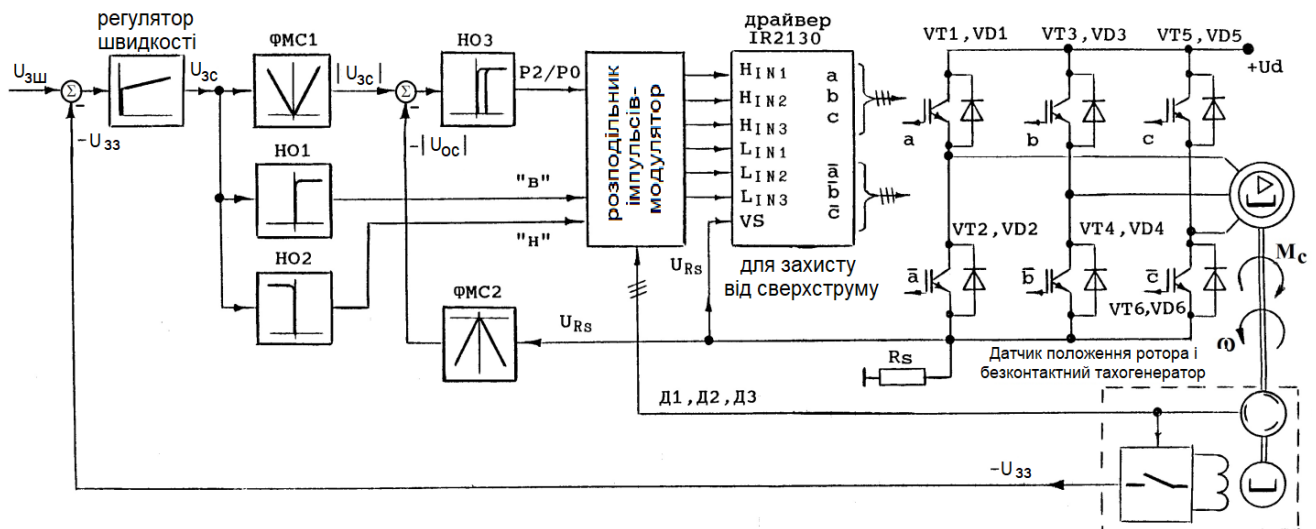


Рисунок 3 – Структурно-функціональна схема електрорушії багатоцільового АПА, побудованого на основі БДПС

На рис. 4 наведені результати моделювання процесів пуску ЕРК з БДПС, згідно зі схемою, наведеною на рис. 3: пуск у «лінійному» режимі на частоту обертання 20 рад/с (графіки 1) і пуск у режимі струмообмеження (графіки 2). Визначено, що максимальне значення діапазону регулювання швидкості може досягати $D \approx 30$, чого цілком достатньо для виконання будь-яких технологічних завдань АПА.

Очевидно, що у пропонованому технічному рішенні пульсації моменту гвинта зростають, проте вартість технічної реалізації електрорушії АПА буде суттєво меншою. Очікується: а) зниження вартості конструкції ЕРК при дрібносерійному виробництві на 18...25 %; б) зниження масогабаритних показників плати керування на 5...7 %; в) підвищення надійності конструкції за рахунок використання меншої кількості комплектуючих елементів на 7...14 %.

ного зворотного зв'язку за струмом. Такий зворотній зв'язок здійснюється за допомогою тільки одного датчика струму, встановленого у ланцюзі джерела живлення, що дозволило застосувати загальний для трьох фаз регулятор струму, хоча і дещо знизив точність його стабілізації. Сигнал зворотного зв'язку за швидкістю формується з імпульсних сигналів вкрай простого датчика положення ротора ДПР (6 імпульсів на один оберт валу) за допомогою активного аналогового фільтра АФ.

На рис. 3 представлена

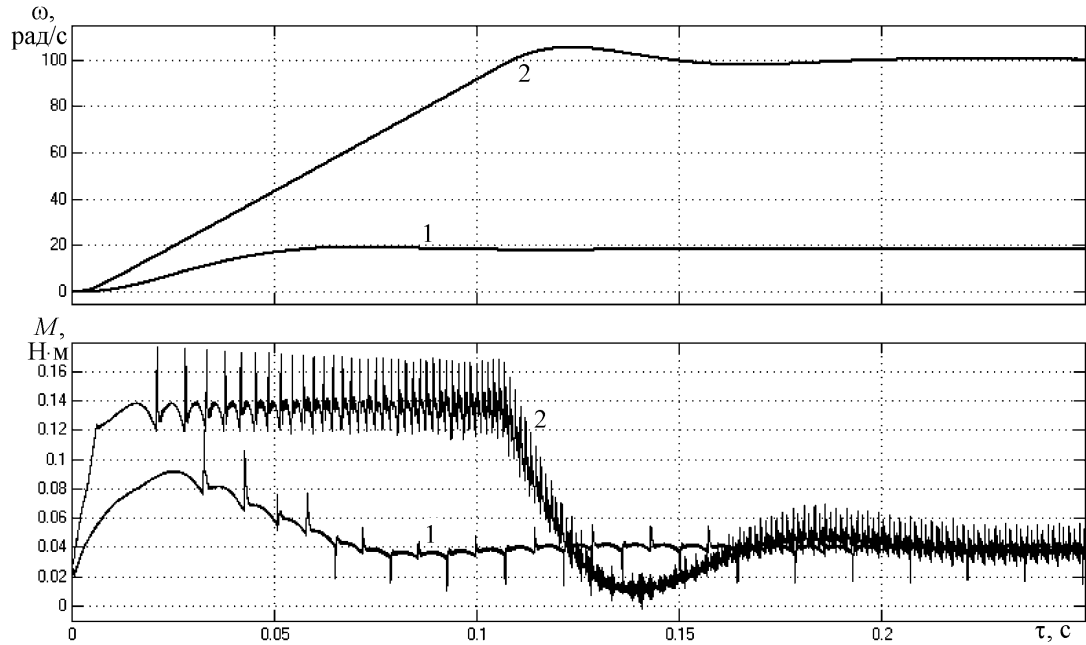


Рисунок 4 – Пуск без навантаження ЕРК з БДПС: 1 – на низьку частоту обертання (до струмообмеження); 2 – на велику частоту обертання (при струмообмеженні)

У п'ятому розділі пропонується послідовність синтезу системи стабілізації курсу (АССК) АПА. Попередньо синтезовані математичні моделі системи електроруху АПА її маршового двигуна як об'єктів керування.

Для створення узагальненої математичної моделі ЕРК АПА із баророзвантаженим електродвигуном (БЕД), у якого внутрішній простір заповнений рідким діелектриком D і у якому обертається ротор, використано систему:

$$\begin{aligned}
 Q_{\Gamma_{x,y,z}} &= \begin{cases} \frac{k_Q \rho D_{\Gamma}^5}{4\pi^2} \left(\frac{\omega_{\text{ЕД}_{x,y,z}}}{i} \right)^2, & \text{при } J_{x,y,z} \in [-1; 1]; \\ k_q \rho D_{\Gamma}^3 \vartheta_{x,y,z}^2, & \text{при } J_{x,y,z}^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \\
 F_{\Gamma_{x,y,z}} &= \begin{cases} \frac{k_F \rho D_{\Gamma}^4}{4\pi^2} \left(\frac{\omega_{\text{ЕД}_{x,y,z}}}{i} \right)^2, & \text{при } J_{x,y,z} \in [-1; 1]; \\ k_f \rho D_{\Gamma}^2 \vartheta_{x,y,z}^2, & \text{при } J_{x,y,z}^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \quad (1) \\
 M_{\text{дин}_{x,y,z}} &= M_{\text{ЕД}} - Q_g - Q_{\Gamma_{x,y,z}}; \quad Q_g = K_q(\tau, D) \omega_{\text{ЕД}_{x,y,z}}; \quad J_{x,y,z} = \frac{2\pi \vartheta_{x,y,z}}{\omega_{\text{ЕД}_{x,y,z}} D_{\Gamma}}
 \end{aligned}$$

де k_Q , k_q і k_F , k_f – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують момент і упор гребного гвинта; ρ – питома щільність води; D_{Γ} – діаметр гребного гвинта (лаговий, вертикальний і ходовий гвинти однакові); $J_{\Gamma_{x,y,z}}$ і $\omega_{\text{ЕД}_{x,y,z}}$ – відносні кроки і кутові швидкості БАД лагового, вертикального і ходового гвинтів; $\vartheta_{x,y,z}$ – проекції вектора швидкості переміщення АПА відносно води на відповідні вісі прямого ходу АПА; $Q_{\Gamma_{x,y,z}}$ – проекції гальмівного моменту гребного гвинта (ГГ) на відповідні вісі; $F_{\Gamma_{x,y,z}}$ – проекції рушійної сили (упору) гвинта на відповідні вісі; $M_{\text{дин}_{x,y,z}}$ – динамічні моменти лагового, вертикального і ходового двигунів; Q_g –

гальмівний гідродинамічний момент, який розраховується як $K_q(\tau, D) \approx 4\mu\pi r^3(L_r/r + L_r/2\delta_1 + r/4\delta_2)$ і є коефіцієнтом втрат гальмівного моменту; D – вид робочої рідини (діелектрика) БАД; τ – температура діелектрика; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості рідкого діелектрика; L_r, r – довжина та радіус ротора; δ_1 – зазор між ротором і статором; δ_2 – зазор між торцевими поверхнями ротора та кришками двигуна.

Лінеаризація (1) дозволила її використання для досліджень роботи електрорушіїв складних морських рухомих об'єктів, у тому числі багатоцільових АПА, з урахуванням суттєвих нелінійних параметрів руху і складових елементів, збурень. Зокрема, її використано при побудові математичної моделі системи стабілізації курсу (ССК). З цією метою визначені вимоги, що необхідні для реалізації можливостей підвищення точності і стабілізації АПА на курсі.

Удосконалено метод ідентифікації параметрів математичної моделі АПА, що входить до складу системи стабілізації курсу. При ідентифікації уточнюються параметри математичної моделі Номото другого порядку:

$$T_1 \cdot T_2(d^2\omega/d\omega^2) + (T_1 + T_2)(d\omega/dt) + \omega + H(\omega) = K\alpha_r + KT_3(d\alpha_r/dt), \quad (2)$$

де ω – кутова частота (швидкість розвороту) судна; $H(\omega) = v_1/\omega/\omega + v_2\omega^3$ – нелінійна функція кутової частоти; $T_1, T_2, T_3, K, v_1, v_2$ – стали часу і коефіцієнти моделі; α_r – кут перекладки стерна. Удосконалення методу визначається наступним. Нехай є дві експериментальні характеристики судна: а) статична залежність сталої кутової частоти циркуляцій ω у функції кута перекладки стерна α_r ; б) результати маневреного випробування «зігзаг». Зі (2) видно, що у статичному режимі ($d\omega/dt = 0$) можна записати рівняння $v_1|\omega_i|\omega_i + v_2\omega_i^3 + \omega = K\alpha_{ri}$ і для позитивної циркуляції отримати вираз:

$$v_2\omega_i^3 + v_1\omega_i^2 + \omega = K\alpha_{ri}. \quad (3)$$

Розділивши вираз (3) на добуток $(\omega_i K)$, отримаємо:

$$v_2\omega_i^2/K + v_1\omega_i/K + 1/K = \alpha_{ri}/\omega_i. \quad (4)$$

Підставивши у (4) різні значення частоти ω_i для відповідних кутів перекладки стерна (2, 4, ..., 30°), отримаємо систему із n -лінійних алгебраїчних рівнянь зі трьома невідомими $v_2/K, v_1/K$ і $1/K$, причому $n > 3$. Це надлишкова система (*RF – Redefined System* або *OS – Overdetermined System*). Її рішення засноване на використанні методу Лагранжа, що згладжує похибки експерименту. Так знаходимо три невідомих параметра (3) – K, v_1, v_2 . Необхідно знайти ще три сталих часу T_1, T_2, T_3 . Проведемо оцінку шуканих сталих часу у такий спосіб. Із експериментальних залежностей «зігзаг» (залежності курсового куту ψ у функції куту перекладки стерна α_r) бачимо, що обидві залежності нелінійні, періодичні і практично симетричні щодо вісі часу. Використовуємо для ідентифікації трьох сталих часу метод розкладання у ряд Фур'є вхідного α_r і вихідного ψ сигналів.

Призначаємо головний період $T = 1/\omega_1$ і обмежимося непарними гармоніками розкладання (1, 2 і 3). У результаті розкладання отримаємо для вхідного сигналу три гармоніки, кожна з них характеризується амплітудою $A_{1r}(\omega_1)$, $A_{3r}(\omega_3)$ і $A_{5r}(\omega_5)$, а також фазою $\varphi_{1r}(\omega_1)$, $\varphi_{3r}(\omega_3)$, і $\varphi_{5r}(\omega_5)$ для відповідних частот ω_1 , $\omega_3 = 3\omega_1$ і $\omega_5 = 5\omega_1$. За аналогією, отримуємо для вихідного сигналу значення амплітуди $B_{1\psi}(\omega_1)$, $B_{3\psi}(\omega_3)$ і $B_{5\psi}(\omega_5)$, фази – $\varphi_{1\psi}(\omega_1)$, $\varphi_{3\psi}(\omega_3)$ і $\varphi_{5\psi}(\omega_5)$.

Комплексні значення коефіцієнтів передачі для кожної гармоніки записуємо (опускаючи для спрощення позначення $\omega_{1,3,5}$) у вигляді відносин вихідного до вхідного сигналу:

$$\begin{cases} K_1 \cdot e^{j\alpha_1} = \frac{B_{1\psi}}{A_{1r}} \cdot e^{j(\varphi_{1\psi} - \varphi_{1r})}; \\ K_3 \cdot e^{j\alpha_3} = \frac{B_{3\psi}}{A_{3r}} \cdot e^{j(\varphi_{3\psi} - \varphi_{3r})}; \\ K_5 \cdot e^{j\alpha_5} = \frac{B_{5\psi}}{A_{5r}} \cdot e^{j(\varphi_{5\psi} - \varphi_{5r})}. \end{cases} \quad (5)$$

Для режиму малих відхилень попередньо знехтуємо у (2) нелінійним членом $H(\omega)$. Тоді отримаємо:

$$T_1 \cdot T_2 (d^2\omega / dt^2) + (T_1 + T_2)(d\omega / dt) + \omega = K\alpha_r + KT_3(d\alpha_r / dt). \quad (6)$$

Передаточна функція, що відповідає виразу (6), буде мати вигляд:

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{\alpha_r(s)} = \frac{(T_3s + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}. \quad (7)$$

Очевидно, що після переходу у частотну область (провівши формальну заміну $s = j\omega$), нескладно записати із (5) і (7) систему із трьома невідомими T_1 , T_2 , і T_3 :

$$\left. \begin{aligned} W_1(j\omega) &= \frac{(T_3j\omega_1 + 1)}{(T_1j\omega_1 + 1)(T_2j\omega_1 + 1)} = K_1 \cdot e^{j\alpha_1}; \\ W_3(j\omega) &= \frac{(T_3j3\omega_1 + 1)}{(T_1j3\omega_1 + 1)(T_2j3\omega_1 + 1)} = K_3 \cdot e^{j\alpha_3}; \\ W_5(j\omega) &= \frac{(T_3j5\omega_1 + 1)}{(T_1j5\omega_1 + 1)(T_2j5\omega_1 + 1)} = K_5 \cdot e^{j\alpha_5}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Система (8) легко вирішується сучасними обчислювальними засобами.

Верифікацію результатів ідентифікації параметрів (2) проводимо на основі порівняння результатів комп'ютерного експерименту «зігзаг 10-10» (отриманих на повномасштабній *DMI*-моделі багатоцільового судна) і відповідних результатів математичного моделювання у середовищі *Matlab*. Результати комп'ютерного експерименту «зігзаг 10-10» представимо у вигляді таблиць даних у функції часу, з апроксимацією проміжних значень (рис. 5).

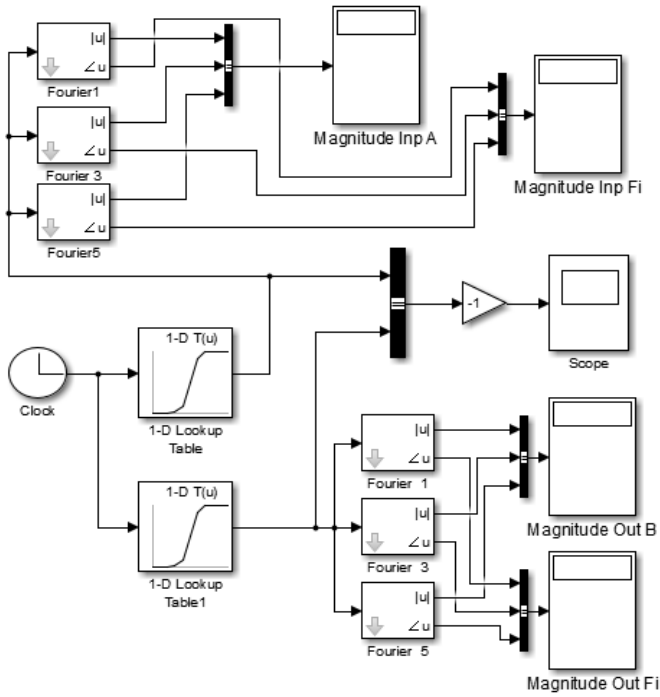


Рисунок 5 – Структурна схема моделі для Фур'є-аналізу результатів маневреного експерименту «зігзаг»

обробкою результатів за допомогою Фур'є-аналізу та подальшого рішення цієї системи, дозволили знайти члени рівняння (2) T_1 , T_2 , і T_3 , що залишилися.

На рис. 6 наведено порівняння результатів експерименту та отриманих за допомогою ідентифікованої моделі випробувань «зігзаг 10-10» багатопільового судна. На цьому рисунку пунктирною лінією (індекс 1) показані дані експерименту, неперервною лінією (індекс 2) – дані моделювання.

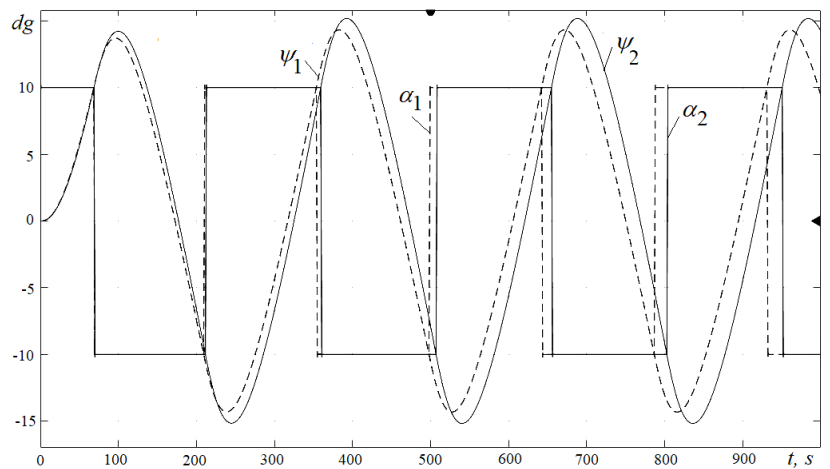


Рисунок 6 – Верифікація результатів моделювання маневреного випробування «зігзаг 10-10»: 1 – експеримент, 2 – моделювання

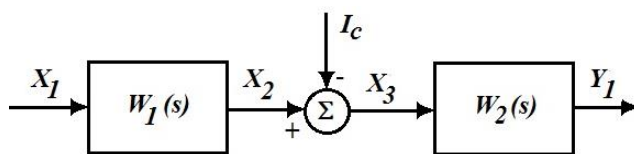


Рисунок 7 – До пояснення принципу «диференційної виделки»

Проведено комп'ютерні експерименти і побудовані: а) статична залежність сталої кутової частоти циркуляцій ω у функції кута перекладки стерна α_r (діаграма керованості); б) маневрове випробування «зігзаг 10-10». Результати маневреного випробування представлені у вигляді відповідних таблиць, внесених у стандартні блоки *Lookup Table* середовища моделювання *Matlab*. Входом таблиць є таймер модельного часу *Clock*, виходами – кут перекладки стерна і курсовий кут (рис. 5). Обробка результатів та подальшого рішення надлишкової системи рівнянь дозволили ідентифікувати значення K , v_1 , v_2 . Моделювання маневреного випробування «зігзаг 10-10», на основі таблиць *Lookup Table* (рис. 5) з

АПА властивостей часткової інваріантності до вітро-хвильових збурень.

Він використає непряме визначення основного збурення $I_c(s)$, відхиляючого судно від заданого курсу і заснований на принципі «диференційної виделки» (рис. 7) – шукане збурення I_c

визначиться на основі вимірювання сигналів X_1 і Y_1 , тобто

$$I_c = X_1 W_1(s) - Y_1 / W_2(s).$$

На рис. 8 представлена функціональна схема двоканальної ССК судна, що за рахунок використання додаткового компенсаційного зв'язку забезпечує досягнення часткової інваріантності до головного збурення. На рис. 8 позначено: РК – регулятор курсового куту ψ судна; КМ – замкнутий контур керування стерною машиною судна; МС – ПФ моделі судна, яка заснована на рівнянні (2) Номото другого порядку; ДЗЗ – датчик зворотного зв'язку (курсного куту) Вим.1, Вим.2, Компенс. – відповідно, пристрої вимірювання та уведення компенсуючого збурення позитивного зворотного зв'язку у ССК.

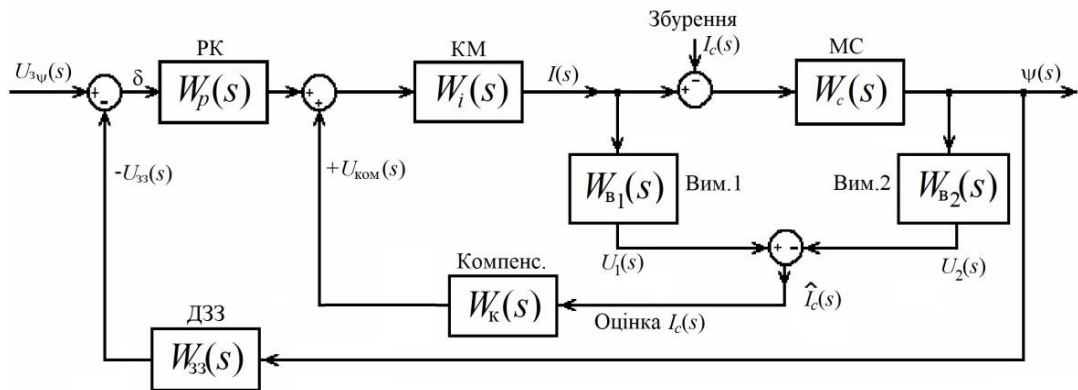


Рисунок 8 – Функціональна схема двоканальної ССК, що забезпечує часткову інваріантність до вітро-хвильового збурення $I_c(s)$

Оцінку дії на корпус судна головного вітро-хвильового збурення проведемо за виразом, що впливає з структурної схеми, зображеної на рис. 7:

$$I_c(s) = I(s) - \psi(s) / W_c(s), \quad (9)$$

відповідно $\hat{I}_c(s) = U_1(s) - U_2(s)$, а $\hat{I}_c(s) \approx I_c(s)$ де $W_c(s)$ – передаточна функція нелінійної математичної моделі судна при стабілізації курсового куту ψ .

Реальні пристрої вимірювання куту повороту стерна і курсового куту ψ мають властивості фільтрування зі сталими часу T_c і T_T . Встановимо на виході датчика куту повороту стерна аперіодичну ланку зі коефіцієнтом передачі і сталою часу, точно такими, як і у датчика курсового куту, а на виході датчика курсового куту – аперіодичну ланку із коефіцієнтом передачі і сталою часу, такими, як у датчика куту повороту стерна. Це спрощує технічну реалізацію системи. Оцінене значення збурення завжди має динамічну похибку, яка визначиться у цьому випадку інерційністю аперіодичної ланки другого порядку $1/((T_c T_T)s^2 + (T_c + T_T)s + 1)$.

Проведено моделювання системи (рис. 8), з урахуванням дії каналу компенсації головного збурення. На рис. 9, а показані процеси зміни у часі результуючого збурення (крива 1). Це потужне збурення, яке викликає суттєву зміну курсу судна. Автостерно намагається відпрацювати це збурення з

допомогою ПД-регулятора курсу. Стабілізація курсового куту ψ на заданому рівні (-5°) класичною системою з ПД-регулятором майже не здійснюється (відхилення до $\pm 2^\circ$, крива 2).

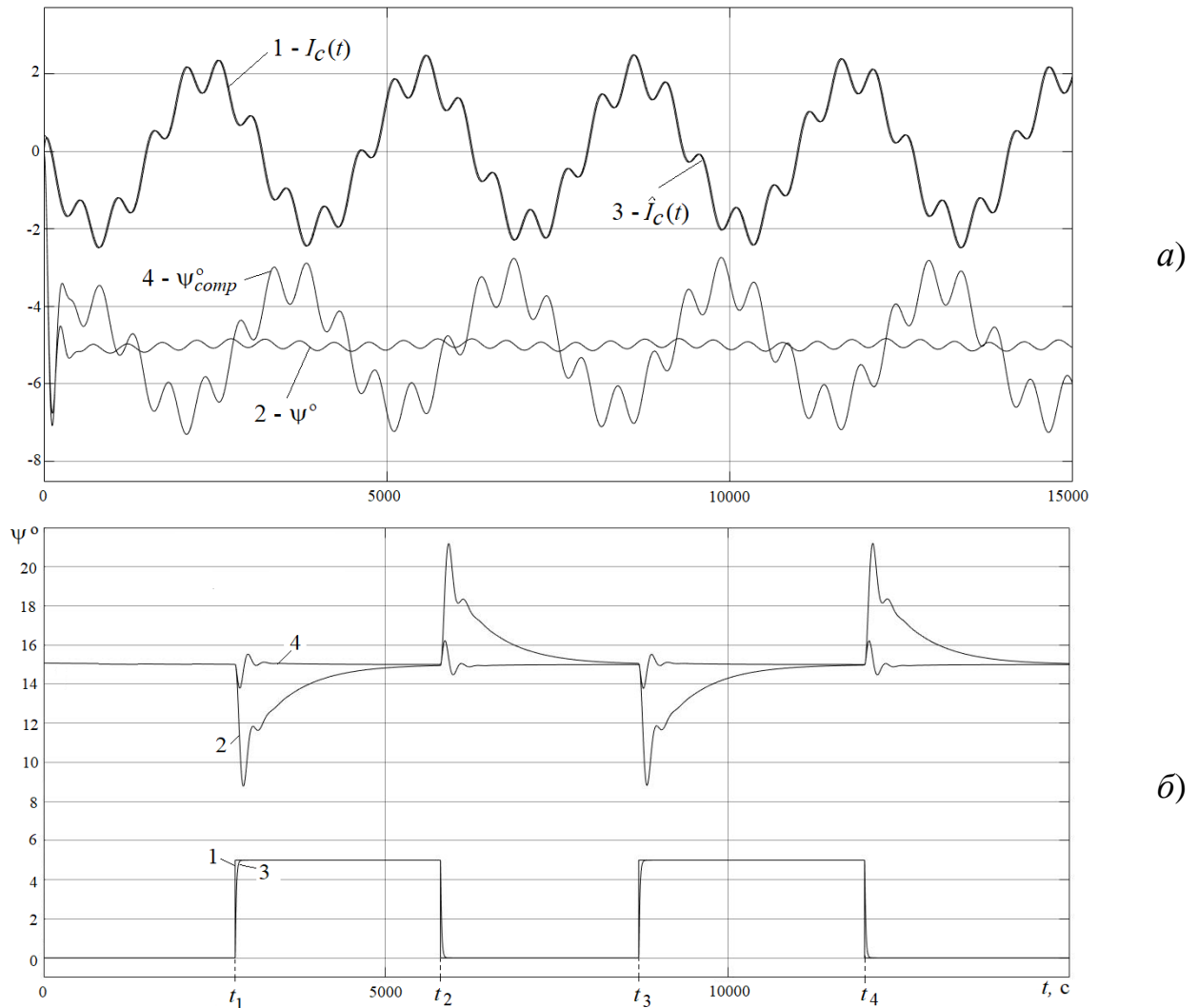


Рисунок 9 – Результати моделювання частково-інваріантної системи (рис. 8) з урахуванням дії збурення та його компенсації

При використанні запропонованої оцінки i за допомогою установки додаткового каналу компенсації результуючого збурення (див. рис. 9), динаміка АССК, навіть без зміни налаштування ПД-регулятора автостерна, суттєво поліпшується. Це ілюструється графіком 3, наведеним на рис. 9, який показує $\hat{I}_c(t)$ – оцінене значення, що практично збігається із кривою 1. Крива 4 показує зміну курсового куту у запропонованій частково-інваріантній до збурень системі стабілізації курсу.

На рис. 9, б показані процеси зміни результуючого збурення (крива 1) у моменти часу $t_1 = 2800$ мс, $t_2 = 5800$ мс та $t_2 = 8700$ мс. Це збурення викликає зміну курсу судна і за рівнем приведено до куту повороту стерна на 5° . За допомогою ПД-регулятора автостерна відпрацьовує збурення – стабілізує курсовий кут ψ на

заданому рівні у 15° . При запропонованій оцінці збурення (див. рис. 8), динаміка АССК, навіть без зміни настроювання ПД-регулятора автостерна, суттєво покращується. Це ілюструється кривою 3, наведеною на рис. 9, яка показує оцінене значення $I_c(t)$, і кривою 4 – змінювання курсового куту у пропонованій частково-інваріантній до збурень АССК.

У шостому розділі запропоновані методи підтримки прийняття рішень: перший – при відборі організацій забезпечення технічного обслуговування і ремонту багатоцільових АПА, другий – при синтезі конструкцій електрорушіїв.

1. Пропонований відбір організацій для технічного обслуговування і ремонту багатоцільових АПА ґрунтується на наступному. Обладнання спеціального призначення обслуговується з дотриманням особливих вимог і обмежень. Завдання відбору при таких умовах «оптимального» постачальника послуг ТО і Р пропонується вирішувати на основі одночасного, аргументованого і зіставленого обліку усіх обраних для аналізу параметрів і характеристик постачальників. Для оцінки та співставлення різних можливих рішень пропонується використання теорії нечітких множин.

У операціях з нечіткими множинами, за множини приналежностей, які лежать у діапазоні $[0, 1]$, перетин \cap нечіткої множини дає нечітку підмножину з функцією приналежності, що є мінімумом функцій приналежності:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad (10)$$

а поєднання \cup нечітких множин дає нечітку підмножину з функцією приналежності, що є максимумом функцій приналежності:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad (11)$$

Для використання зазначених властивостей нечітких множин у результуючих інтегральних оцінках підприємств-організацій забезпечення ТО і Р, уявімо нечітку множину, що задана на універсальній множині організацій O :

$$\dot{p}_j = \left\{ \frac{\mu_j(o_1)}{o_1}, \frac{\mu_j(o_2)}{o_2}, \dots, \frac{\mu_j(o_n)}{o_n} \right\}, \quad (12)$$

де функція приналежності $\mu_j(o_i)$, характеризує i -організацію на універсальній множині $o \in O$. Ранжирування відбувається з урахуванням вагових коефіцієнтів g_i , визначених експертами або за способом «найгіршого значення». Тоді

$$\mu_{\dot{p}}(o_i) = \sum_{j=1}^m g_j \cdot \mu_j(o_i), \quad (13)$$

де сума всіх (позитивних) вагових коефіцієнтів ($g_1 + g_2 + \dots + g_m = 1$).

Вагові коефіцієнти g_1, g_2, \dots, g_m характеризують відносну важливість кожного з параметрів $p_j \in P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ у значенні функції приналежності

$\mu_j(o_i)$ у діапазоні значень від нуля до одиниці для кожної організації з множини $o_i \in O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$. Використовуючи теорію матриць, можна записати добуток:

$$M_{\dot{p}} = M \cdot G, \quad (14)$$

який є матрицею з елементів множини $M_{\dot{p}} = \{\mu_{\dot{p}}(o_i), \dots, \mu_{\dot{p}}(o_n)\}$, що визначає інтегральну перевагу організації одної перед іншою. Організацією з найвищим інтегральним показником буде та, у якій найбільше (максимальне) значення функції приналежності:

$$\mu_{\dot{p}}(o_{opt}) = \max_{o_i \in O} \mu_{\dot{p}}(o_i). \quad (15)$$

За допомогою отриманих виразів пропонується визначити вагові коефіцієнти організацій, використовуючи їхню відносність до рангу найгіршої за даним параметром з конкуруючих організацій забезпечення ТО і Р (див. табл. 1). Фактичний опис параметрів представлений у табл. 2.

Таблиця 1 – Визначення для кожного i -го параметра щодо найгіршого значення (l)

Нечітке значення	Ранг для відношення R_i/R_l
Якщо p_i дорівнює p_l	1 і менше
Проміжне значення	2
Якщо p_i незначно краще, ніж p_l	3
Проміжне значення	4
Якщо p_i краще, ніж p_l	5
Проміжне значення	6
Якщо p_i значно краще, ніж p_l	7
Проміжне значення	8
Якщо p_i абсолютно краще, ніж p_l	9 і більше

Таблиця 2 – Визначені параметри оцінювання організацій забезпечення ТО і Р

Параметр	Опис параметру, характеристики для багатоцільових АПА	Шкала, одиниця виміру
p_1	Якість дефектування	{Дуже Низька; Низька; Середня; Висока; Дуже Висока}
p_2	Строки дефектування	{0, ∞ }, днів
p_3	Розрахункова вартість ТО і Р	{0, ∞ }, тис. грн.
p_4	Розрахункові строки ТО і Р	{0, ∞ }, днів
p_5	Імідж (історія, авторитет тощо) організації	{Дуже Низький; Низький; Середній; Високий; Дуже Високий}
p_6	Умови сплати за послуги дефектування, ТО і Р	{Передоплата; Кредит; За фактом}
p_7	Сервісне й гарантійне обслуговування	{Дуже Низьке; Низьке; Середнє; Високе; Дуже Високе}
p_8	Віддаленість організації, інфраструктура	{Дуже Далеко; Далеко; Недалеко; Дуже Близько}
p_9	Матеріально-технічний і фінансовий стан організації	{Дуже Поганий; Низький; Середній; Високий; Дуже Високий}

Встановлені експертами значення параметрів (див. табл. 1 та табл. 2) для конкуруючих організацій наведені у табл. 3. У табл. 4, за кожним з оцінюваних параметрів, виділений найгірший параметр (НП) з множини P і встановлений відповідний ранг (табл. 1). За допомогою (13)–(15) визначаємо вагові коефіцієнти всіх організацій, використовуючи їхню відносність до рангу найгіршої, за даним параметром, з множин конкуруючих організацій забезпечення ТО і Р багатоцільових АПА.

Таблиця 3 – Параметри оцінки організації щодо забезпечення ТО і Р

Пара- метр	Організації					
	o_1	o_2	o_3	o_4	o_5	o_6
	Експертна оцінка можливостей організацій з забезпечення ТО і Р					
p_1	Середній	Високий	Середній	Дуже високий	Високий	Дуже високий
p_2	13	13	12	18	17	13
p_3	1100	1115	1120	1220	1180	1300
p_4	31	31	32	37	33	38
p_5	Середній	Середній	Високий	Дуже високий	Дуже високий	Середній
p_6	За фактом	Кредит	За фактом	Передоплата	Передоплата	За фактом
p_7	Середній	Середній	Середній	Високий	Середній	Дуже високий
p_8	Дуже близько	Недалеко	Недалеко	Дуже далеко	Недалеко	Далеко
p_9	Середній	Високий	Середнє	Дуже гарне	Високий	Середній

Таблиця 4 – Найгірший параметр і відповідний ранг

Параметр	Організації					
	o_1	o_2	o_3	o_4	o_5	o_6
	Ранг організацій з забезпечення ТО і Р					
p_1	НП, 4	7	5	9	8	10
p_2	7	7	8	НП, 5	6	7
p_3	9	8	8	7	7	НП, 6
p_4	9	9	8	5	7	НП, 4
p_5	8	НП, 7	9	10	10	8
p_6	10	7	10	НП, 2	3	10
p_7	8	НП, 7	8	9	8	10
p_8	10	9	9	НП, 2	9	4
p_9	НП, 6	10	7	9	10	7

Згідно (15), рейтинги організацій, що забезпечують ТО і Р багатоцільових АПА розподілені наступним чином (табл. 5).

Зрозуміло, що у реальному інтегрованому оцінюванні організацій, які пропонують на конкурентних умовах послуги ТО і Р для СТС спеціального призначення, наприклад багатоцільових АПА, слід використовувати набагато більшу кількість (більше 30) параметрів, факторів, характеристик і можливостей цих організацій, які необхідно об'єктивно урахувати для співставлення.

Таблиця 5 – Результуючі рейтинги організацій щодо забезпечення ТО і Р

Організація	Інтегральний показник	Рейтинг	Відносний інтегральний показник
o_2	0,135	1	1
o_3	0,116	2	0,86
o_1	0,093	3	0,69
o_6	0,092	4	0,68
o_5	0,072	5	0,53
o_4	0,046	6	0,34

2. При синтезі конструкцій ЕРК АПА, з оглядом на те, що електрорушій – СТС, використані методи рішення задач багатокритеріальної оптимізації. Це передбачає наявність математичної моделі або моделей процесів, або поведінки всієї системи, яка включає основні етапи системного аналізу у класичному вигляді – етапи постановки, побудови і вирішення.

На етапі постановки задачі здійснюється обрис кордонів досліджуваної системи (параметричними, функціональними та критеріальними обмеженнями), представленої у вигляді математичної моделі, що залежить від r варійованих параметрів $\alpha_1, \dots, \alpha_r$, які вважаються точкою $(\alpha_1, \dots, \alpha_r)$ у r -вимірному просторі.

Параметричні обмеження мають вигляд нерівності:

$$\alpha_j^* \leq \alpha_j \leq \alpha_j^{**}, \quad j = \overline{1, r}. \quad (16)$$

Функціональні обмеження записуються аналогічно, у вигляді нерівності:

$$c_\ell^* \leq f(\alpha) \leq c_\ell^{**}, \quad \ell = \overline{1, t}. \quad (17)$$

Критеріальні обмеження являють собою локальні критерії якості виду:

$$\Phi_v(\alpha) \leq \Phi_v^{**}, \quad v = \overline{1, k} \quad (18)$$

або

$$\Phi_v(\alpha), \quad v = \overline{1, k}, \quad (19)$$

де Φ_v^{**} – екстремальне значення критерію $\Phi_v(\alpha)$.

Наприкінці етапу формулюється задача багатокритеріальної оптимізації, згідно з якою потрібно знайти множину $EP \in D$, що задовольняє рівності:

$$\Phi(EP) = \Phi(\alpha), \quad \alpha \in D,$$

де $\Phi(\alpha) = (\Phi_1(\alpha), \dots, \Phi_k(\alpha))$ – вектор критеріїв; EP – множина Еджворта-Парето.

При цьому слід мати на увазі, що вектор $\Phi(\alpha) < \Phi(\beta)$ тільки у разі, якщо $\Phi_v(\alpha) \leq \Phi_v(\beta)$, $v = 1, k$ і хоча б для одного $v_0 \in \{1, k\}$ $\Phi_{v_0}(\alpha) < \Phi_{v_0}(\beta)$.

На етапі побудови задачі використовується ієрархічний підхід для розгляду досліджуваного об'єкта. Нижній рівень становлять підсистеми, а верхній – система у цілому. Оптимізація на нижньому рівні виявляється простішою, якщо використовувати такі умови взаємодії локальних критеріїв з глобальними як: а) у підсистемі можуть бути критерії, які неявним чином впливають на критерії всієї системи, а тому вони можуть бути відсутні в списку критеріїв всієї системи; б) у системі можуть бути критерії, які на рівні підсистем неможливо розрахувати; в) є

критерії, які можуть бути розраховані, як для системи у цілому, так і для її підсистем. Врахування умов взаємодії критеріїв по перших двох варіантах досить просте, а по третьому – найбільш складне. Визначимо три схеми побудови задач.

За першою схемою передбачається, що є математичні моделі системи, які не представляється можливим оптимізувати, наприклад, через тривалість отримання рішення. Однак можна розрахувати значення критеріїв Φ_v . *За другою схемою* побудови задач система розбивається на підсистеми. Зв'язки, за допомогою яких підсистеми взаємодіють між собою, відносять до зовнішніх. Для виділення підсистеми у вигляді автономної системи розглядається її взаємодія з усіма іншими підсистемами, а також зовнішніми збуреннями з боку навколишнього середовища, використовуючи при цьому принцип Даламбера-Ейлера або рівняння Лагранжа. *За третьою схемою* слід дотримуватися третьої умови взаємодії критеріїв. Якщо є один або кілька локальних критеріїв $\Phi_v(\alpha^{(i)})$ для i -ї підсистеми (сукупності декількох підсистем), що володіють властивістю домінування по відношенню до відповідних критеріїв інших підсистем, то зменшення (збільшення) значення критерію $\Phi_v(\alpha^{(i)})$ не менше, ніж на деяку величину $Ea(\Phi_v(\beta^{(i)}) > \Phi_v(\alpha^{(i)})) + Ea$ призводить до зменшення (збільшення) значення відповідного критерію $\Phi_v(\beta)$ всієї системи у порівнянні зі $\Phi_v(\alpha)$. Дана умова означає, що у системі є одна, або декілька, підсистем, які визначають якість системи за v -м критерієм.

На етапі вирішення задачі передбачається, що підсистеми можна оптимізувати і виконується умова $t \ll T$, де t – сумарний час розрахунку $\Phi_v(\alpha)$; T – час розрахунку $\Phi_v(\alpha)$; α – вектор параметрів системи, який відповідає всім α^i .

Головна ідея оптимізації системи полягає у тому, що, оптимізуючи кожен з підсистем, отримуємо псевдоприпустиму множину $D^{(i)}$, що більше істинно припустимої, тобто $D^{(i)} > D$. Після чого із цих псевдомножин визначаються по векторах відповідні вектори всієї системи. На утвореній множині здійснюється перевірка: чи задовольняються критеріальні та функціональні обмеження системи для отримання допустимої множини D всієї системи? Оптимальне рішення шукається на множині $EP \in D$. Псевдоприпустима область i -ої підсистеми $D^{(i)}$ має властивість домінування при $\alpha^{(i)} \in D^{(i)}$ і $\alpha \in D$.

Такий методологічний підхід до багатокритеріальної оптимізації характерний для лінійних і нелінійних систем електроруку, а також систем енергоресурсозбереження морських транспортних засобів різного призначення. На цій основі розроблено метод підтримки прийняття «компромісних рішень» при синтезі СТС різного призначення. Пропонується здійснювати синтез найбільш ефективної за декількома прийнятими особою, що приймає рішення (ОПР) параметрами і обмеженнями системи на основі інтегральних критеріїв якості і з використанням принципу Еджворта-Парето. У процесі синтезу ОПР не використовує окремі вирашні ситуації, засновані на критеріях для ряду альтернативних варіантів, а оцінює компромісні варіанти, наприклад, у ході діалогу з програмним середовищем. Ідея практичного використання представленого методу прийняття «компромісних рішень» полягає у наступному.

Нехай експертами відібрані параметри синтезованої ЕРК $\alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n$ і можливі складові елементи системи: двигуни і редуктори (табл. 6 і табл. 7). Задача

полягає у тому, щоб відібрати «найкращим» чином комбінацію елементів системи ЕРК «двигун-редуктор», попередньо, наприклад, за вартістю. Очевидне значення – мінімум сумарної вартості складових елементів. Але згідно принципу Еджворта-Парето, цей мінімум розглядається тільки як відправна точка для поліпшення інших функціоналів або критеріїв системи за рахунок прийняття компромісів, тобто – при ослабленні вимог до деяких, обраних ОПР, критеріїв і обмежень.

Послідовність дій ОПР наступна.

1. ОПР визначає максимальне і мінімальне значення відібраних параметрів: $\alpha_{i_{\min}} < \alpha_i < \alpha_{i_{\max}}$, де $\alpha_{i_{\min}}$ і $\alpha_{i_{\max}}$ – мінімальне і максимальне значення i параметру (при $i = 1, \dots, n$) і встановлює функціональні обмеження. У якості варійованих параметрів приймаємо наступні: $a_1 = P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність двигуна, кВт; $a_2 = n_{\text{ном}}$ – номінальна частота обертання двигуна, об/хв; $a_3 = M_{\text{ном}}$ – номінальний момент двигуна, Нм; $a_4 = J_{\text{дв}}$ – момент інерції двигуна, кг·м²; $a_5 = m_{\text{дв}}$ – маса двигуна, кг; $a_6 = CT_{\text{дв}}$ – вартість двигуна, у.о.; $a_7 = m_p$ – маса редуктора, кг; $a_8 = CT_p$ – вартість редуктора, у.о.; $a_9 = i$ – передавальне число редуктора.

Таблиця 6 – Параметри електродвигунів ЕРК АПА

Двигун	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/хв	$M_{\text{ном}}$, Нм	$J_{\text{дв}}$, кг·м ²	$m_{\text{дв}}$, кг	$C_{\text{дв}}$, у. о.
М1	1,20	1500	7,80	0,025	91	239
М2	1,40	1000	13,60	0,046	97	312
М3	1,15	2200	4,99	0,014	74	261
М4	1,25	1000	11,90	0,017	61	247
М5	1,50	1500	9,60	0,014	52	234
М6	1,50	2240	6,40	0,017	61	272
М7	1,20	2200	5,20	0,011	41	182
М8	1,10	1000	10,50	0,013	33	220

Таблиця 7 – Параметри редукторів ЕРК АПА

Редуктор	i	M , Нм	m_p , кг	V_p , см ³	C_p , у. о.
Р1	2–8,0	1000	75	$33,0 \cdot 10^{-3}$	58,0
Р2	2–8,25	800	70	$32,0 \cdot 10^{-3}$	54,8
Р3	2–8,24	900	80	$34,4 \cdot 10^{-3}$	57,0
Р4	1,8–8,0	660	84	$32,9 \cdot 10^{-3}$	55,6
Р5	2–8,0	500	75	$22,6 \cdot 10^{-3}$	60,7

2. ОПР вводить функціонали (критерії) $\Phi_1 \dots \Phi_m$, для яких необхідно знайти екстремум. Якість кожного варіанту конструкції ЕРК оцінює ОПР за п'ятьма функціоналами: сумарна маса двигуна і редуктора Φ_1 , сумарна вартість Φ_2 , прискорення Φ_3 , час перехідного процесу Φ_4 , кінетична енергія Φ_5 . Критерії обчислюються безпосередньо з параметрів: $\Phi_1 = a_5 + a_7$ – сумарна маса; $\Phi_2 = a_6 + a_8$ – сумарна вартість; $\Phi_3 = (M_{\text{мах}} - M_{\text{хх}} \cdot i) / J_{\text{пр}}$ – максимальне прискорення при розгоні АПА; $\Phi_4 = (J_{\text{пр}} \cdot n_{\text{ном}}) / (M_{\text{мах}} - M_{\text{хх}} \cdot i)$ – мінімальний час перехідних процесів, що визначає динаміку АПА; $\Phi_5 = 0,5 \cdot J_{\text{пр}} \cdot n_{\text{ном}}^2$ – запас кінетичної енергії, що визначає енергоефективність ЕРК у динаміці; $J_{\text{пр}} = (J_{\text{дв}} + J_p)$ – сума моментів

інерції двигуна і редуктора, де значення J_p прийнято постійним ($0,01 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$) для всіх варіантів.

3. Серед змінних параметрів довільно вибирається розрахункова точка для якої перевіряється виконання визначених ОПР функціональних обмежень. Якщо функціональні обмеження не виконуються, точка з подальшого синтезу системи виключається. Якщо функціональні обмеження виконуються, точка зберігається як j -та пробна точка і для неї обчислюються значення всіх функціоналів Φ_1, \dots, Φ_m . Таким чином складається таблиця варіантів для кожного з функціоналів, значення яких розміщуються за зростанням ваги. На цьому етапі ОПР аналізує отримані таблиці та призначає (змінює) функціональні обмеження.

4. Перевіряється сумісність обмежень, і якщо виконані всі функціональні обмеження, то ОПР отримує всі необхідні точки для подальшого аналізу. Якщо такі точки не виявлені, то ОПР послаблює функціональні (критеріальні) обмеження або переходить до аналізу інших, якщо вони доступні, варіантів складових елементів ЕРК.

Взагалі, з таблиць 6 і 7 даних видно, що можна одержати 40 можливих варіантів задовільних рішень і при цьому будуть отримані різні техніко-експлуатаційні і економічні показники. Після аналізу сформованих таблиць з'являється можливість змінювати критеріальні обмеження. Це дозволить ОПР з'ясувати, який виграш за іншими параметрами дають деякі послаблення критеріїв і до чого може привести підвищення жорсткості обмежень. Але у будь-якому випадку, у залежності від поставлених критеріїв, завжди буде існувати кращий варіант за рядом параметрів, і можливо, найкращий варіант з можливих комбінацій за одним, або за декількома, параметрами. Якщо елементів, що утворюють систему буде не два («двигун – редуктор»), а більше, то очевидно, що «вручну» найкращу, одночасно за кількома критеріями, комбінацію таких елементів знайти практично неможливо.

Подальшим встановлюються вагові коефіцієнти для кожного з функціоналів з їх підсумовуванням. Вага функціоналу визначається за його положенням у таблиці – при умові сортуванні від найкращого варіанту до найгіршого. Мінімальна сума вагових коефіцієнтів функціоналів покаже «непокращуваний» варіант, навіть якщо він не матиме найкращі показники за іншими функціоналами. Тут у дію вступає ОПР: із кількох вищих за списком варіантів обирає найбільш прийнятний. Алгоритм визначення варіанту наступний.

1. Перепишемо таблицю 4, у якій додатково, біля кожного з розрахованих вище функціоналів, записуємо його порядковий номер по мірі заповнення таблиці варіантами (наприклад, як у частково заповненій табл. 8).

Таблиця 8 – Вихідна таблиця функціоналів за варіантами

i	Φ_1	i	Φ_2	i	Φ_3	i	Φ_4	i	Φ_5
1	136	1	305	1	2831	1	33,5	1	104,7
2	161	2	293,6	2	753	2	174,4	2	320
3	177	3	368	3	731	3	123,5	3	264,6
4	158	4	316,6	4	883	4	215,5	4	371,5
5	127	5	294,7	5	2946	5	49	5	184,9

2. Сортується кожна пара стовпців (номера за списком і самого функціоналу) за зростанням (або зменшенням) відповідно до уподобань до функціоналу і додається ще один стовпець, у який записується вага функціоналу (P_{Φ}), що відповідає номеру сортування самого функціоналу (див. табл. 9).

3. Далі проводиться пересортування кожних трьох стовпців за номером функціоналу, тобто функціонали шикуються за порядком первісного запису. Після цього проводиться розрахунок суми ваг функціоналів кожного варіанту і результат додається у додаткову колонку (див. табл. 10):

$$\sum P_i = P_{\Phi_{1i}} + P_{\Phi_{2i}} + P_{\Phi_{3i}} + P_{\Phi_{4i}} + P_{\Phi_{5i}}.$$

Таблиця 9 – Пересортована таблиця за значеннями функціоналів і їх ваги

i	P_{Φ_1}	Φ_1	i	P_{Φ_2}	Φ_2	i	P_{Φ_3}	Φ_3	i	P_{Φ_4}	Φ_4	i	P_{Φ_5}	Φ_5
17	1	103	7	1	237	5	1	2946	8	1	28	8	1	82,7
21	2	108	24	2	238	14	2	2946	17	2	28	17	2	82,7
7	3	111	16	3	239	20	3	2946	21	3	28	21	3	82,7
8	4	113	22	4	240	25	4	2946	24	4	28	24	4	82,7
22	5	116	17	5	275	1	5	2831	1	5	33,5	1	5	105

Таблиця 10 – Визначення сумарної ваги функціоналів за варіантами

i	P_{Φ_1}	Φ_1	P_{Φ_2}	Φ_2	P_{Φ_3}	Φ_3	P_{Φ_4}	Φ_4	P_{Φ_5}	Φ_5	ΣP
1	12	136	17	305	5	2831	5	33,5	5	105	44
2	21	161	11	294	20	753	20	174	20	320	92
3	25	177	23	368	22	731	16	124	15	265	101
8	4	113	6	277	9	2738	1	28	1	82,7	21
17	1	103	5	275	10	2738	2	28	2	82,7	20

4. У фінальну таблицю заносяться номер варіанту, його функціонали та сумарна вага функціоналів, за якою і сортується таблиця (див. табл. 11).

Таблиця 11 – Фінальна таблиця з сумою ваг функціоналів

i	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	ΣP
17	103	274,8	2738	28	82,7	20
8	113	277	2738	28	82,7	21
21	108	278	2738	28	82,7	26
24	125	237,6	2738	28	82,7	30
20	122	288,8	2946	49	184,9	42
5	127	294,7	2946	49	184,9	43
1	136	305	2831	33,5	104,7	44
19	131	301,8	2831	33,5	104,7	46
14	136	289,6	2946	49	184,9	47
7	111	236,8	1732	97,5	291,9	49
13	145	302,6	2831	33,5	104,7	51
25	132	291	2946	49	184,9	51
23	141	304	2831	33,5	104,7	57
16	121	239	1732	97,5	291,9	58
22	116	240	1732	97,5	291,9	59

Продовження таблиці 11

6	136	330	2127	124,6	467,7	89
2	161	293,6	753	174,4	320	92
15	141	329	2127	124,6	467,7	93
10	166	294	753	174,4	320	98
4	158	316,6	883	215,5	371,5	100
3	177	368	731	123,5	264,6	101
9	163	558	412	237	104,7	101
11	167	366,8	731	123,5	264,6	102
18	152	554,8	412	237	104,7	102
12	154	318	883	215,5	371,5	103

Верхні значення відповідають отриманим раніше «компромісним» результатам. Як видно з табл. 11 не існує варіанту з найкращими показниками за всіма функціоналами і не виключений навіть варіант, коли не буде жодного найкращого функціоналу. Але у той же час сумарна вага функціоналів показує, що сукупність параметрів у верхніх варіантах близька до «оптимальної». Таким чином, можна автоматизувати попередню обробку даних за сумою ваг функціоналів, і лише на фінальному етапі підключити експертів (ОПР) для прийняття остаточного «компромісного рішення».

Представлені особливості підтримки прийняття рішень дозволяють вирішувати задачі синтезу складних систем різного призначення і знаходити варіант системи, непоказаний («оптимальний») за кількома критеріями одночасно, але з незначним погіршенням інших. Використовуючи надані принципом Еджворта-Парето можливості ослаблення критеріальних обмежень та наведену послідовність дій, можна автоматизувати отримання найкращих, з можливої множини альтернативних варіантів, параметри для будь-якої складної системи.

У розділі 7 розроблюється спеціалізований моделюючий комплекс для експериментальних досліджень електрорушіїв багатоцільових АПА.

Для зведення до мінімуму впливу допущень на якість керування системою, необхідно проводити експерименти на конкретному електроприводі, що не завжди можливо, або на його натурній імітаційній моделі. Для цього був розроблений спеціалізований моделюючий комплекс (СМК), до складу якого входить навчально-дослідницький лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1». Фото СМК представлено на рис. 10.



Рисунок 10 – Фото спеціалізованого моделюючого комплексу:
 1 – силовий блок-1;
 2 – силовий блок-2;
 3 – блок інтерфейсу;
 4 – блок вимірювання;
 5 – електромеханічний блок;
 6 – блок керування (ПЕОМ)

СМК містить:

а) електромеханічну частину (електродвигуни постійного та змінного струму) з програмно керованим електромеханічним навантаженням;

б) програмну частину моделей АСК ЕР з БАД, бібліотеки даних з синтезованими регуляторами;

в) інтерфейс електромеханічної і програмної частин.

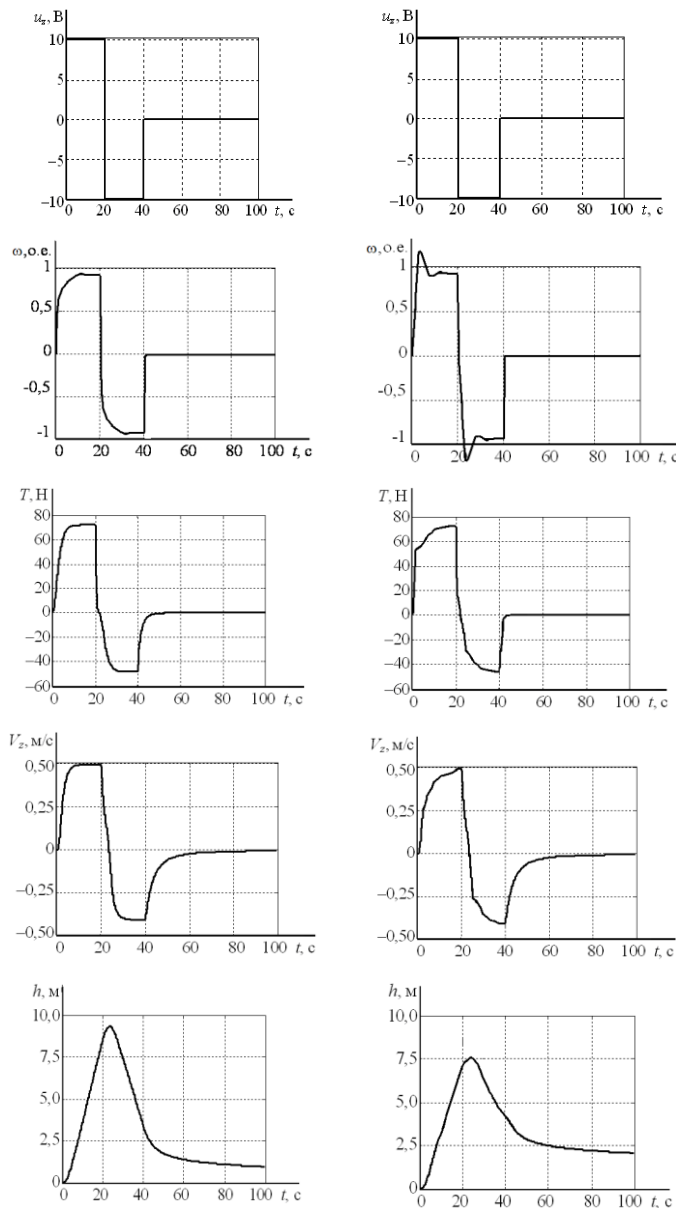


Рисунок 12 – Моделювання просторового руху АПА з приводом постійного струму:
а) під час руху АПА у вільній воді;
б) керованого пуску з системою керування заснованої на нечіткій логіці

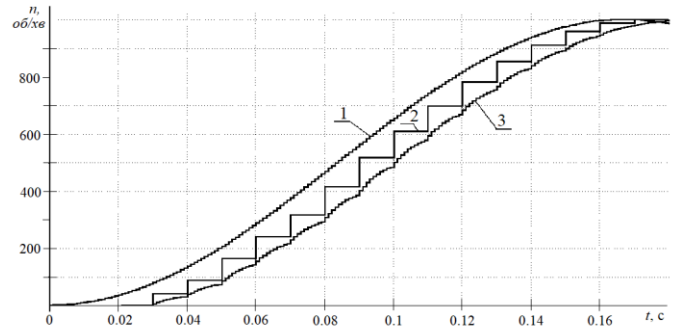


Рисунок 11 – Результат моделювання сигналу вимірювача частоти обертання електрорушії

Проведено експериментальні дослідження динамічних характеристик цифрового тахогенератора. На рис. 11 представлені результати його моделювання: 1 – вхідний сигнал; 2 – сигнал, що імітує вихід з вимірювача частоти обертання; 3 – сигнал після цифрового фільтра. З рис. 11 видно, що затримка сигналу менша 0,03 с, а сигнал має вигляд, практично ідентичний формі вхідного сигналу.

Наведено приклади синтезу АСК рухом АПА та їх експериментальні дослідження за допомогою побудованого СМК.

Для перевірки адекватності математичної моделі просторового руху АПА проведені дослідження за допомогою системи *Simulink* для підводної системи з АПА масою 45 кг, гребним гвинтом діаметром 20 см, редуктором з передавальним числом 1:4,5 і електродвигуном постійного струму потужністю 400 Вт з номінальною швидкістю обертання 5500 об/хв. Результати моделювання ЕРК наведені на рис. 12.

Дослідження показали, що похибка визначення упорів рушіїв в швартових режимах між імітаційної моделлю і роботою АПА в реальних умовах менша 7 %, а похибка у визначенні параметрів вертикального

руху – не більше 5%. Таким чином, доведено, що розроблена модель просторового руху АПА адекватна фізичним процесам. Це дає можливість використовувати її для дослідження ефективності різних типів регуляторів у системі керування рухом АПА і синтезу необхідних характеристик ЕРК. Проведено експериментальні дослідження різних типів регуляторів у системі керування частотою обертання електрорушієм постійного струму за допомогою СМК. При проведенні експериментальних досліджень різних типів регуляторів в системі керування частотою обертання гвинтом АПА, в структуру стенда імплементовано плату введення - виведення *PCI-1711L* фірми *Advantech*. Спільна дія цієї моделі і стенду СВ-1, дозволило використовувати їх як спеціалізований моделюючий комплекс (СМК) для комбінованих досліджень ЕРК різного типу, з можливістю паралельного відпрацювання алгоритмів керування на математичних моделях і експериментально.

Наприклад, схема керування електрорушієм постійного струму з використанням нечіткого регулятора (НР), побудована у пакеті *Simulink* і приведена на рис. 13.

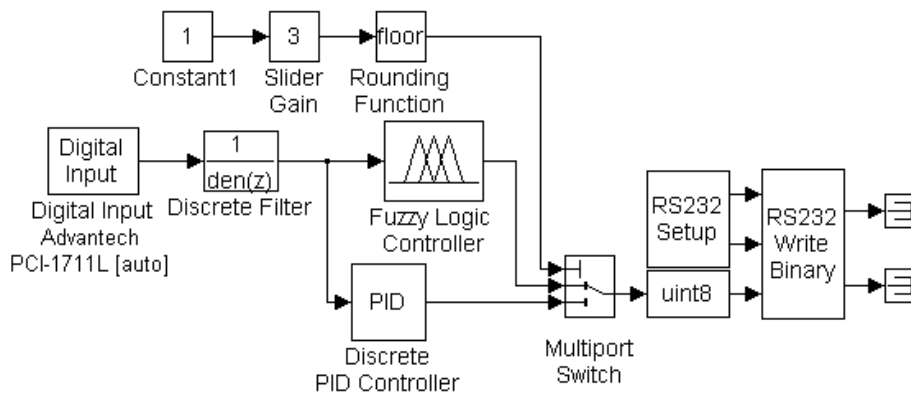


Рисунок 13 – Схема керування електрорушієм постійного струму з НР і ПІД-регулятором

розгін від 0 до 1000 об/хв (момент навантаження на валу дорівнює $0,1M_H$), момент інерції системи дорівнює 0,128 Нм. Результати експерименту наведені на рис. 14.

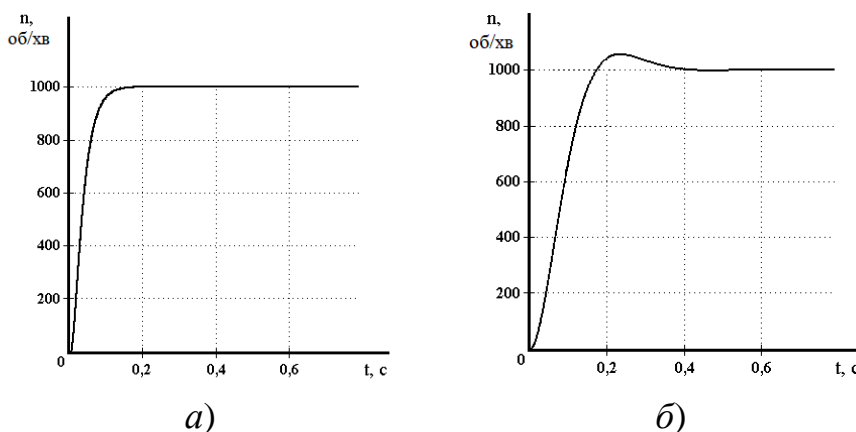


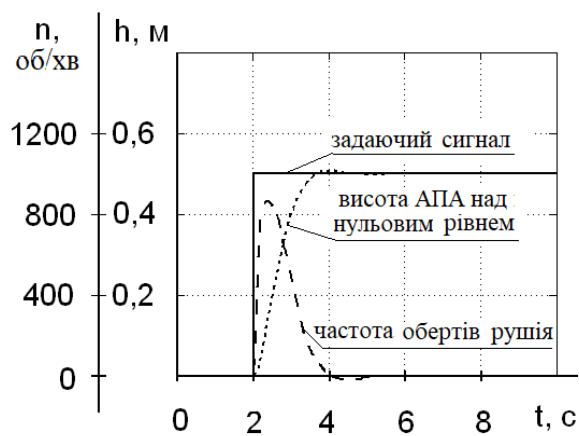
Рисунок 14 – Результати експериментальних досліджень систем керування електрорушієм постійного струму: а) з нечітким регулятором; б) з цифровим ПІД регулятором

При запуску системи з ПІД-регулятором перерегулювання становить 9%, а час

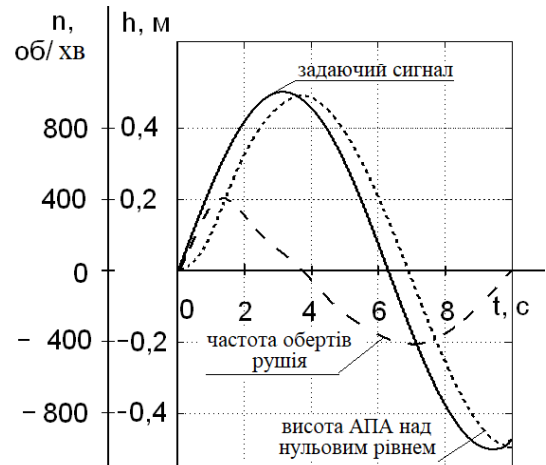
заспокоєння – 0,35 с. Це пояснюється наявністю люфтів у з'єднаннях і малої інерцією навантажувальної машини, у порівнянні із приводною. Застосування НР дозволило звести перерегулювання майже до нуля і знизити час перехідного процесу до 0,2 с. Застосування плати *PCI-1711L* дозволило контролювати перебіг процесів у реальному часі, а розроблене ПЗ – практично одночасно проводити дослідження регуляторів, як з нечіткою логікою так і типових П, ПІ, ПІД-регуляторів.

При розробці нових і модернізації існуючих АПА однією з основних задач є його енергоефективність. Досліджено систему енергозберігаючого керування вертикальним рухом АПА за допомогою СМК. Вирішується поставлена задача різними способами і на різних стадіях проектування. Це може бути як конструктивне рішення (певної форми корпус, кількість і розташування рушіїв), так і застосування сучасних систем керування. Одна з переваг пропонованого стенду і систем керування рушіями – це можливість їх глибокого і всебічного аналізу вже на стадії аван-проективання і легкість перенесення синтезованих ситуативних моделей на реальний об'єкт. Наприклад, у зв'язку із адаптивністю НР до реальних умов експлуатації, це незалежність від загальних конструктивних особливостей АПА. А так як застосування заходів енергозбереження не повинно впливати на виконання основних задач, покладених на АПА, то їх необхідно всебічно досліджувати.

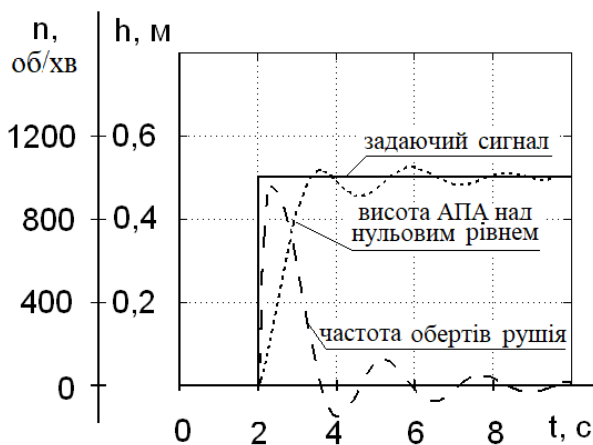
Для аналізу енергоефективності синтезованих систем зі НР і ПІД-регулятором проведено їх порівняння. Результати представлені на рис. 15 і рис. 16.



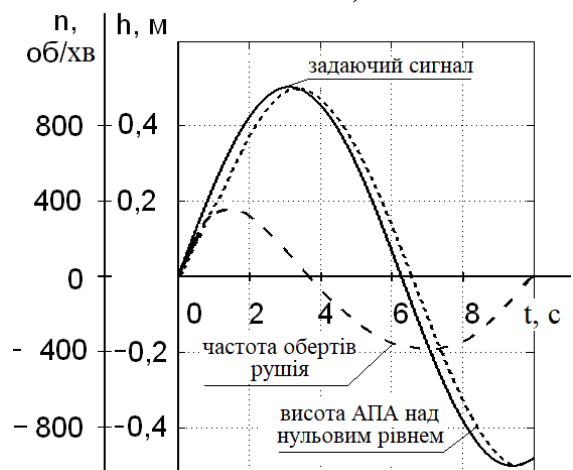
а)



а)



б)



б)

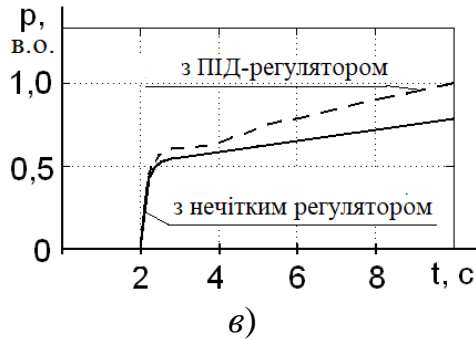


Рисунок 15 – Реакція АПА на задаючий ступінчастий сигнал вертикального руху:

- а) система з нечітким регулятором;
 б) система з ПД-регулятором;
 в) порівняння спожитої енергії при різних регуляторах

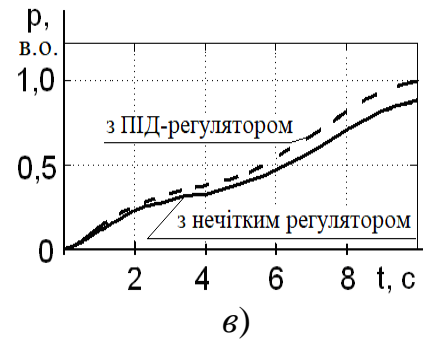
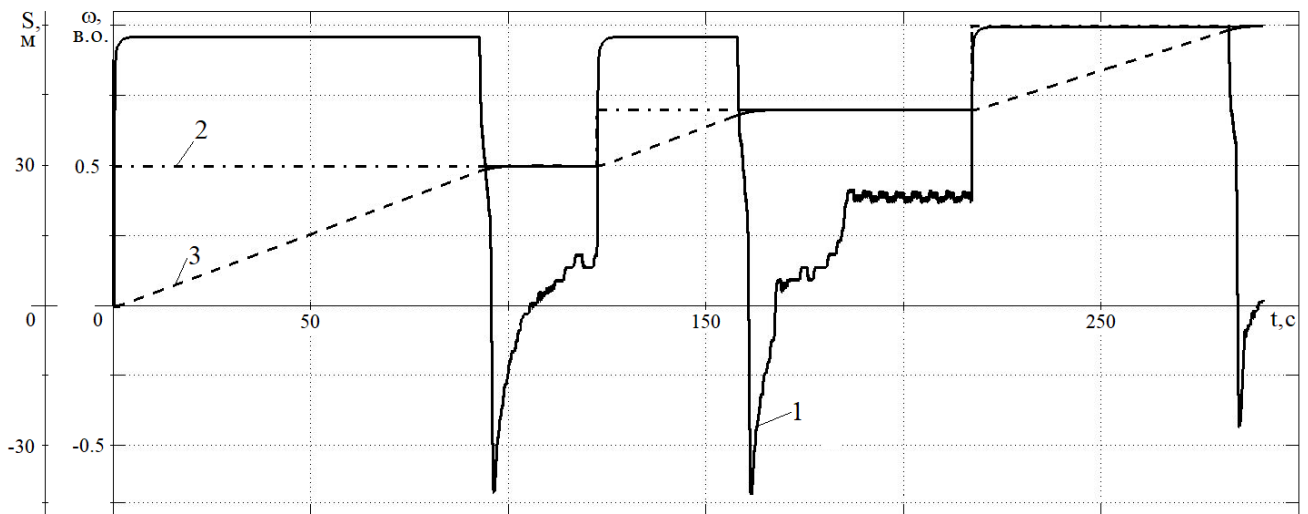


Рисунок 16 – Реакція АПА на задаючий синусоїдальний сигнал вертикального руху: а) система з ПД-регулятором;

- б) система з нечітким регулятором;
 в) порівняння спожитої енергії при різних регуляторах

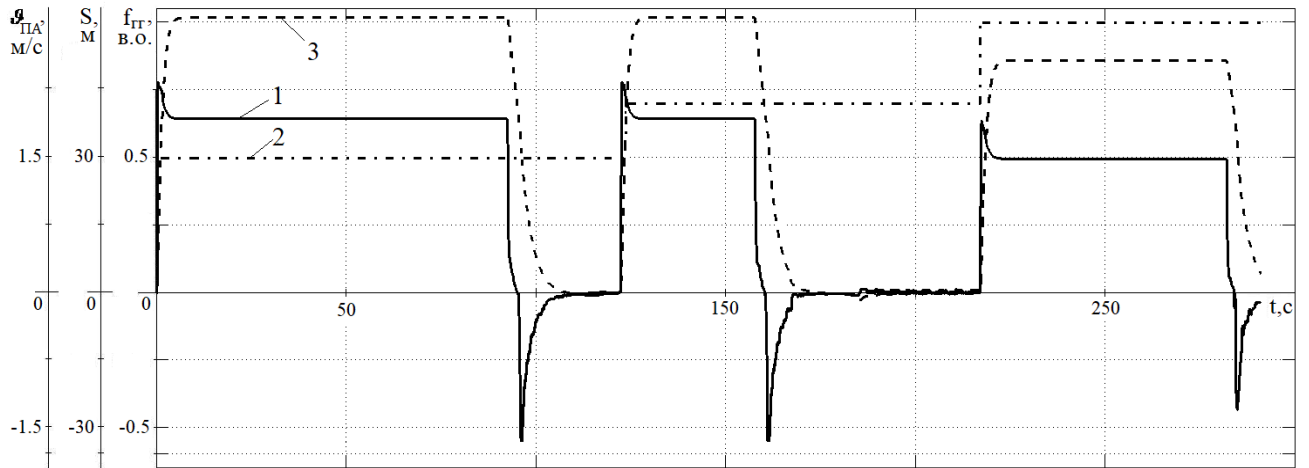
Проведені дослідження показали, що застосування нечіткого регулятора в системі керування вертикальним рухом АПА дозволяє у порівнянні з ПД-регулятором: а) при ступінчастому заданому сигналі: скоротити у 1,5 разів час перехідного процесу; звести до мінімуму переколювання; зменшити на 19 % спожиту за перехідний період енергію; б) при синусоїдальному сигналі: скоротити у два рази відставання від задаючого сигналу; зменшити на 13 % спожиту за перехідний період енергію.

Розроблено та досліджено АСК електрорушійми при горизонтальному прямолінійному русі АПА з різними типами регуляторів. При проведенні досліджень не враховувалися динамічні процеси, що відбуваються з АПА при його поворотах навколо вертикальної вісі. Результати моделювання роботи синтезованих систем керування при горизонтальному прямолінійному русі АПА з адаптивними ПД-регуляторами представлені на рис. 17 а, б, із НР – на рис. 18 а, б.



а)

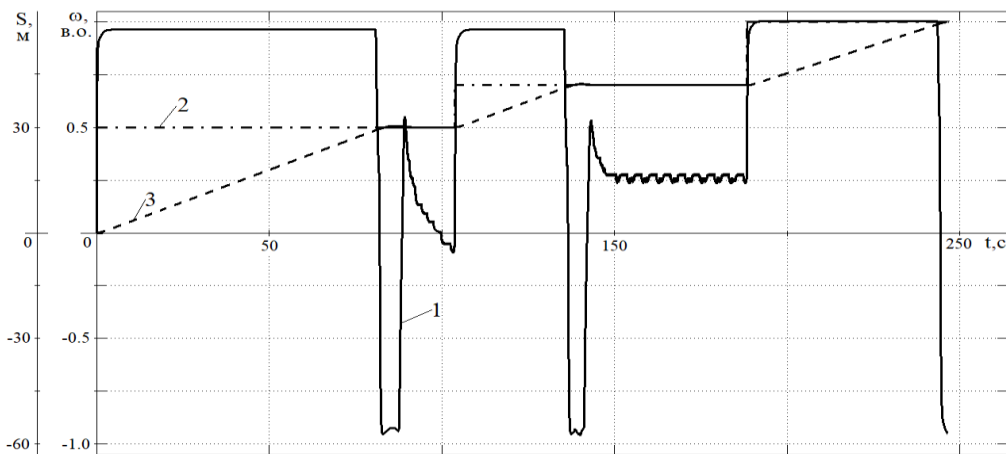
- 1 – кутова швидкість обертання ГГ; 2 – завдання u_{zad} ; 3 – координата горизонтального прямолінійного переміщення АПА



б)

1 – упор гвинта; 2 – завдання u_{zad} ; 3 – швидкість горизонтального прямолінійного переміщення АПА

Рисунок 17 – Результати моделювання роботи синтезованої АСК ЕР при горизонтальному прямолінійному русі АПА з адаптивними ПІД-регуляторами



1 – кутова швидкість обертання ГГ;
2 – завдання u_{zad} ;
3 – координата горизонтального прямолінійного переміщення АПА

а)



1 – упор ГГ;
2 – завдання u_{zad} ;
3 – швидкість горизонтального прямолінійного переміщення АПА

б)

Рисунок 18 – Результати моделювання роботи синтезованої АСК ЕР при горизонтальному прямолінійному русі АПА з нечітким регулятором

З графіків, представлених на рис. 17 видно, що АСК електрорушієм при

горизонтальному прямолінійному русі АПА з ПД-регуляторами і нечіткими регуляторами виконали програму переміщення АПА за заданим алгоритмом. При цьому у перехідних режимах (розгін, гальмування АПА) автоматизована система керування з нечіткими регуляторами показала більшу високу швидкість відпрацювання сигналу.

Додатково проведені дослідження АСК на її робастність, які також підтверджують високу якість процесів керування АПА при його горизонтальному русі.

Проведені дослідження функціонування розроблених і синтезованих АСК електрорушійними при горизонтальному прямолінійному русі АПА з адаптивними ПД-регуляторами і НР доводять, що АСК з адаптивними ПД-регуляторами при гальмуванні АПА має значення перерегулювання кутової швидкості обертання ГТ на 12 % менше, ніж АСК з НР. Система керування при горизонтальному прямолінійному русі АПА з НР виводить АПА на кінцеву координату на 15 % швидше, ніж система керування з адаптивними ПД-регуляторами. Точність виведення на задану координату АПА при роботі АСК з НР регуляторами на 29 % вище, ніж при роботі АСК з адаптивними ПД-регуляторами, це значно підвищує ефективність пропонованого керування ЕРК автономного плавального апарата.

Доведена універсальність розробленого програмно-апаратного забезпечення, що дозволяє на одній лабораторній базі синтезувати регулятори частоти обертання електрорушійними, а також проводити їх експериментальні дослідження.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано і доведено нове концептуальне вирішення актуальної наукової проблеми підвищення ефективності експлуатації електрорушійних комплексів при забезпеченні виконання багатоцільового АПА основного його технологічного завдання і при одночасному виконанні вимог до екологічності, безпечності експлуатації, універсальності застосування, мінімуму собівартості, розширених функціональних можливостях, конструктивної спрощеності і швидкого налагодження виробництва у достатній кількості.

1. Запропоновано метод ідентифікації параметрів нелінійної математичної моделі Номото при керуванні морськими суднами різного призначення, який, при використанні і подальшій обробці результатів маневрених експериментів типу «зігзаг», дозволяє уточнювати математичні моделі керування судном і будувати ефективні системи стабілізації курсового куту морських суден різного призначення.

2. Запропоновано метод побудови системи стабілізації курсу морських суден різного призначення, який за рахунок непрямого визначення відхиляючого судно від заданого курсу основного збурення і введення у систему властивостей часткової інваріантності до вітро-хвильових збурень, дозволяє суттєво підвищити якість процесів стабілізації курсу та зменшити витрати енергії, має спрощену технічну реалізацію і забезпечує збільшення часу автономної дії суден. На основі результатів моделювання систем стабілізації курсу за «за відхиленням» під дією збурень і ПД «технічно оптимальним» регулятором автостерна, встановлено, що максимальне динамічне відхилення досягає $\pm 2^\circ$. За аналогічних умов навантажень, але з роботою запропонованої частково-інваріантної до збурень

системи, максимальне динамічне відхилення, близьке до $\pm 0,35^\circ$. При інших умовах збурень, максимальне динамічне відхилення, близько до $1,3^\circ$ при зниженні часу регулювання (входження у 5 % зону). Отримані результати дозволяють рекомендувати пропоновану систему для дослідної апаратної реалізації у ЕРК АПА і подальших експериментальних досліджень.

3. Запропоновано метод підтримки прийняття рішень при забезпеченні багатоцільових засобів водного транспорту технічним обслуговуванням і ремонтом (ТО і Р), який засновано на адитивному використанні методів кваліметрії, експертних оцінок і лінгвістичних висловлювань, і використовує удосконалену процедуру розрахунку різнорідних інтегрованих показників ТО і Р, що забезпечує багатоцільові засоби водного транспорту аргументованим визначенням «найкращого» підприємства для проведення ТО і Р.

4. Удосконалено метод синтезу математичних моделей електрорушійних комплексів із баророзвантаженими двигунами, який за допомогою урахування втрат гальмівного гідродинамічного моменту працюючих у середовищі рідкого діелектрика баророзвантажених двигунів, дозволяє створити, практично нечутливі до змін робочих температур та виду діелектриків, високоточні системи керування рухом автономних плавальних апаратів.

5. Реалізовані принципи побудови електрорушійних комплексів АПА за принципом «мінімальної апаратної надмірності», що підвищує надійність їх функціонування і зменшує вартість апаратної частини без суттєвого погіршення основних регульовальних і енергетичних характеристик. В умовах дрібносерійного виробництва ЕРК АПА, виконаних на основі БДПС і принципу «мінімальної апаратної надмірності», очікується зниження вартості конструкції ЕРК на 18–25 % при одночасному зменшенні масогабаритних показників плат керування на 5–7 % (у порівнянні з базовими варіантами конструктивних рішень).

6. Ітераційне використання інтегрованих показників для можливих комбінацій елементів електрорушійних комплексів в удосконаленій методиці підтримки прийняття рішень при визначенні складових елементів ЕРК, дозволило знайти варіанти, непокрощувані за кількома критеріями одночасно із незначним погіршенням інших критеріїв та дозволяє синтезувати складні технічні системи різного цільового призначення, де варійовані параметри змінюються у широких межах.

7. Урахування нелінійних залежностей, зокрема, при визначенні функцій напруги та частоти в математичній моделі ЕРК з баророзвантаженими асинхронними електродвигунами і різними типами їх систем живлення, дозволило підвищити адекватність результатів імітаційного моделювання ЕРК реальним фізичним процесам та більш ефективно проводити за різними критеріями оптимізацію ЕРК АПА.

8. Аналітичне доведення можливостей застосування для ЕРК багатополюсних асинхронних електродвигунів на підвищеній частоті джерела живлення без суттєвого їх переконструювання дозволило досягти суттєвого запасу потужності і електромагнітного моменту ЕРК при забезпеченні режимів екстрених маневрів АПА. Використання запропонованого і практично простого у застосуванні методу переконструювання електродвигунів малої потужності (до 750 Вт) для ЕРК,

дозволяє досягти збільшення їх номінальної потужності на 9–12 %, при цьому маса їх активної частини знижується на 2–7 %, а енергетичний фактор зростає на 5–7 %.

9. Удосконалено метод оцінки енергоефективності різних конструктивних переробок однакових за висотою вісі обертання електродвигунів ЕРК, який при їх багатофакторному інтегрованому порівнянні, дозволив визначати результуючі масогабаритні й енергетичні параметри двигунів електрорушіїв автономних плавальних апаратів для різних частот джерел живлення, конструкцій і активних матеріалів.

10. Запропоновано конструкцію, спроектовано і створено спеціалізований моделюючий стенд для дослідження ефективності систем керування ЕРК АПА, призначений для відпрацювання у лабораторних умовах різних алгоритмів і принципів управління, вимірювання енергетичних і динамічних характеристик ЕРК різного типу. Використання запропонованих і введених у експлуатацію дослідницько-лабораторних стендів лабораторій «Енергозбереження в електроприводі» та «Технічних засобів автоматизації систем контролю і керування транспортних засобів», дозволило підвищити ефективність процесу навчання суднових фахівців, використати для підвищення їх кваліфікації, проводити широкий спектр споріднених досліджень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Локарев, В. И. Особенности переключения статорной обмотки асинхронного двигателя с «треугольника» на «звезду» в целях энергосбережения / В. И. Локарев, **Я. Б. Волянская** // Зб. наук. праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. – 2006. – № 2 (407). – С. 136–145.

2. Андриющенко, О. А. Формирование выходного напряжения ТПН, инвариантного фазе тока нагрузки / О. А. Андриющенко, А. А. Бойко, **Я. Б. Волянская** // Електромашинобудування та електрообладнання. Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 66. – С. 33–35.

3. **Волянская, Я. Б.** Энергетическая оптимизация асинхронного электропривода путем плавного регулирования напряжения / Я. Б. Волянская // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Сб. науч. трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки). Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» – 2007. – С. 80–81.

4. **Волянская, Я. Б.** Оценка измерения погрешностей тарированного момента и моментомера / Я. Б. Волянская, С. М. Волянский // Електромашинобудування та електрообладнання. Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 68. – С. 32–35.

5. Волянский, С. М. Сравнительный анализ регуляторов, применяемых в системах управления энергосберегающим электроприводом постоянного тока / С. М. Волянский, **Я. Б. Волянская** // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – Вип. 4 (51). – Ч. 2 – С. 106–108.

6. Волянский, С. М. Измерение потребляемой мощности при исследовании нейронечетких регуляторов электроприводов постоянного тока / С. М. Волянский,

Я. Б. Волянская // Зб. наук. праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. – 2009. – № 6 (423). – С. 127–130.

7. Локарев, В. И. Обобщенная динамическая модель судовых автоматизированных электроприводов для расчета рабочих процессов при их проектировании и эксплуатации / В. И. Локарев, **Я. Б. Волянская** // Зб. наук. праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. – 2011. – № 6 (441). – С. 41–45.

8. Волянский, С. М. Повышение качества управления электроприводами движительно-рулевого комплекса подводных аппаратов / С. М. Волянский, **Я. Б. Волянская** // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – Вып. 15 (91). – С. 224–227.

9. Волянский, С. М. Разработка и исследование системы управления движительно-рулевым комплексом при горизонтальном прямолинейном движении подводного аппарата с различными типами регуляторов / С. М. Волянский, **Я. Б. Волянская** // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – Вып. 19 (95). – С. 79–82.

10. Волянский, С. М. Особливості побудови автоматичних систем керування рухом об'єктів морської робототехніки / С. М. Волянский, **Я. Б. Волянська** // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2016. – Вип. 23 (99). – С. 39–44.

11. Локарев, В. И. Расчет рабочих характеристик асинхронного электропривода / В. И. Локарев, **Я. Б. Волянская** // Зб. наук. праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. – 2017. – № 2. – С. 57–62.

12. **Волянська, Я. Б.** Особливості використання регуляторів різних типів у системах керування електрорухом спеціальних плавальних засобів / Я. Б. Волянська, С. М. Волянский // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2017. – Вип. 3/2017. – Ч. 1 (104). – С. 14–19.

13. **Волянская, Я. Б.** Особенности синтеза системы электродвижения автономного плавательного аппарата / Я. Б. Волянская // Проблемы інформаційних технологій – 2017. – № 22 (2017). – С. 108–116.

14. **Волянська, Я. Б.** Система стабілізації курсу морського судна, частково-інваріантна до вітро-хвильових навантажень / Я. Б. Волянська, В. В. Голіков, О. М. Мазур, О. А. Онищенко, В. А. Шевченко // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2018. – № 2 (2018). – Т. 10. – С. 57–63.

15. **Волянська, Я. Б.** Метод відбору організацій для технічного обслуговування і ремонту багатоцільових суден подвійного призначення / Я. Б. Волянська, О. М. Мазур, Т. С. Обнявко, О. А. Онищенко // Управління проектами та розвиток виробництва: Зб. наук. пр. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля (Сєверодонецьк). – 2018. – № 2 (66). – С. 5–18.

16. **Волянська, Я. Б.** Методика підтримки прийняття «компромісних рішень» при синтезі складних систем різного призначення / Волянська Я. Б., Волянский С. М., Обнявко Т. С., Онищенко О. А. // Управління проектами та розвиток виробництва: Зб. наук. пр. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля (Сєверодонецьк). – 2018. – № 3 (67). – С. 5–15.

17. **Volyanskaya, Ya.** Tasks of control system's automation for multi purpose

dual-duty vessels / Ya. Volyanskaya, S. Volyanskiy / Slovak international scientific journal. – Bratislava, Slovakia. – 2020. – № 41. – Vol. 1. – P. 33–38.

18. **Volyanskaya, Ya.** Development of specialized modeling complex to study control systems of movable maritime objects / Ya. Volyanskaya, S. Volyanskiy // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 1/9 (85). – P. 26–33. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.91966. (Scopus)

19. **Volyanskaya, Ya.** Brushless valve electric drive with minimum equipment excess for autonomous floating vehicle / Ya. Volyanskaya, S. Volyanskiy, O. Onishchenko // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2017. – № 4. – P. 26–33. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.4.05. (Scopus)

20. Boyko, A. Synthesis of the system for minimizing losses in asynchronous motor with a function for current symmetrization / A. Boyko, **Ya. Volyanskaya** // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 4/5 (88). – P. 50–58. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108545. (Scopus)

21. **Volyanskaya, Ya.** Determining energy-efficient operation modes of the propulsion electric motor of an autonomous swimming apparatus / Ya. Volyanskaya, S. Volyanskiy, V. Volkov, O. Onishchenko // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 6/8 (90). – P. 11–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.118984. (Scopus)

22. **Волянська, Я. Б.** Уточнення параметрів математическої моделі трьохфазного асинхронного електродвигателя системи електродвиження автономного плавального апарату / Я. Б. Волянська, С. М. Волянський, О. А. Онищенко / Морські інтелектуальні технології. – 2017. – № 4 (38). – Т. 3 – С. 133–138. (Web of Science)

23. **Volyanskaya, Ya.** Analysis of possibilities for improving energy indicators of induction electric motors for propulsion complexes of autonomous floating vehicles / Ya. Volyanskaya, S. Volyanskiy, O. Onishchenko, S. Nikul // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2018. – № 2/8 (92). – P. 25–32. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126144. (Scopus)

24. **Volyanskaya, Ya.** Synthesis of mathematical model of controlled electromotive device of pilotless floating vehicle / Ya. Volyanskaya // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 172 (2018), 012008. DOI:10.1088/1755-1315/172/1/012008. (Scopus)

25. Boyko, A. Development of the gearless electric drive for the elevator lifting mechanism / A. Boyko, **Ya. Volyanskaya** // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2018. – № 4/1 (94). – P. 72–80. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139726. (Scopus)

26. **Volyanskaya, Ya.** Research of possibilities to increase the exactness of ship stabilizing on a course / Ya. Volyanskaya, S. M. Volyanskiy, O. A. Onishchenko, V. A. Shevchenko // Marine Intellectual Technologies. – 2019. – №3 (45). – I. 3 – P. 174–181. (Web of Science)

27. Патент 56964, Україна, МПК G 01L 3/04, G01L 3/10. Пристрій для вимірювання обертового моменту / **Волянська Я. Б.**, Волянський С. М. (Україна); Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № а200900408; заявл. 20.01.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 3.

28. Golikov, V. V. A simple technique for identifying vessel model parameters / Golikov V. V., Golikov V. A., **Volyanskaya Ya.**, Mazur O., Onishchenko O. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 172 (2018), 012010. DOI:10.1088/1755-1315/172/1/012010. (Scopus)

29. **Волянська, Я. Б.** Спрощена модель безконтактного вентильного електроприводу та його технічна реалізація для автономного плавального апарата / Я. Б. Волянська, О. А. Онищенко // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2018. – № 1 (2018). – Т. 10. – С. 64–68.

30. Блинцов, В. С. Стенд для експериментальних досліджень ефективності нейронечетких регуляторів електроприводів постійного току / Блинцов В. С., Блинцов С. В., **Волянская Я. Б.**, Волянский С. М., Костенко Д. В. // Электроприводы переменного тока: материалы XIV Междунар. научн.-техн. конф., Екатеринбург, 13–16 марта 2007 г. – Екатеринбург, 2007. – С. 295–298.

31. **Волянская, Я. Б.** Разработка асинхронного двигателя для движительно-рулевого комплекса подводного аппарата / Я. Б. Волянская, С. М. Волянский // Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів: матеріали Всеукраїн. наук.-техн. конф., Миколаїв 25–26 квітня 2012 р. – Миколаїв, 2012. – С. 129–131.

32. **Волянская, Я. Б.** Синтез нечетного регулятора для САУ вертикального маршевого движителя подводного аппарата / Я. Б. Волянская, С. М. Волянский // Підводна техніка і технологія: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф., Миколаїв, 30–31 жовтня 2012 р. – Миколаїв, 2012. – С. 84–87.

33. **Волянская, Я. Б.** Основные задачи синтеза систем автоматического управления движением подводных аппаратов в условиях неопределенности / Я. Б. Волянская, С. М. Волянский // Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф., Миколаїв, 24–25 квітня 2013 р. – Миколаїв, 2013. – С. 158–161.

34. **Волянська, Я. Б.** Моделювання горизонтального прямолінійного руху підводного апарата / Я. Б. Волянська, С. М. Волянський // Інформатика. Культура. Техніка: матеріали Українсько-німецької конф., Одеса, 30.06–02.07 2016 р. – Одеса, 2016. – С. 88–89.

35. **Волянська, Я. Б.** Огляд сучасних методів синтезу систем керування морських рухомих об'єктів / Я. Б. Волянська, С. М. Волянський // Підводна техніка і технологія: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф., Миколаїв, 15–16 грудня 2016 р. – Миколаїв, 2016. – С. 15–18.

36. **Волянська, Я. Б.** Система електродвиження автономного плавального апарата / Я. Б. Волянська, О. А. Онищенко // Актуальні проблеми суднової електроенергетики, електромеханіки та радіоелектроніки: матеріали наук.-метод. конф. НУ «ОМА», 11–12 грудня 2017 р. – Одеса, 2017. – С. 68–70.

37. **Волянська, Я. Б.** Методика естимації параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна для рішення задач моделювання систем управління об'єктів морської робототехніки / Я. Б. Волянська // Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації: матеріали XVI Міжнар. наук.-техн. конф., Кременчук, 12–13 квітня 2018 р. – Кременчук, 2018. – С. 31–33.

38. **Волянська, Я. Б.** Багатоцільові судна та застосування цивільних суден у

допоміжному флоті: історія, сучасність, майбутнє / Я. Б. Волянська, Ю. М. Довіденко, О. М. Мазур, О. А. Онищенко // Technical sciences: history, the present time, the future, EU experience: materials of the International scientific and practical conference, Wloclawek, September 27–28, 2019. – Republic of Poland, 2019. – P. 150–154.

39. **Волянська, Я. Б.** Особливості прийняття конструктивних рішень при створенні пропульсивного комплексу автономного плавального апарата подвійного призначення / Я. Б. Волянська, С. М. Волянський, О. А. Онищенко // MPP&O – 2020: матеріали II Міжнар. наук.-практ. морської конференції каф. СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, квітень 2020 р. – Одеса, 2020. – С. 119–123.

40. Волянський, С. М. Тренди розвитку багатоцільових автономних плавальних апаратів подвійного призначення / С. М. Волянський, Я. Б. Волянська, О. А. Онищенко // Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах: матеріали XX наук.-техн. конф., ДНДІ ВС ОВТ, 03–04 вересня 2020 р. – Чернігів, 2020. – С. 52–54.

41. Волянська, Я. Б. Основи наукових досліджень / Я. Б. Волянська, С. М. Волянський. – Миколаїв: Іліон, 2017. – 216 с. ISBN 978-617-534-442-2.

42. Волянська, Я. Б. Моделювання електромеханічних систем / Я. Б. Волянська, С. М. Волянський; під ред. проф. Онищенко О. А. – Миколаїв: Іліон, 2018. – 246 с. ISBN 978-617-534-483-5.

АНОТАЦІЯ

Волянська Я. Б. *Методологія підвищення ефективності експлуатації електрорухливих комплексів багатоцільових автономних плавальних апаратів.* – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.20.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту (05 – технічні науки). – Державний університет інфраструктури та технологій МОН України, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну, важливу для забезпечення ефективного функціонування цивільного і військового флотів України, наукову проблему підвищення ефективності експлуатації багатоцільових автономних плавальних апаратів (АПА). Проблема вирішується на основі синтезу нового та удосконалення існуючого обладнання суднових електроенергетичних і керуючих систем, розвитку їх математичного, апаратного, інформаційного та програмного забезпечення, зокрема – автоматизованих систем керування (АСК) електрорухливими комплексами (ЕРК) суден багатоцільового призначення, методів моделювання процесів керування, підвищення їх ефективності експлуатації і ремонту.

Розроблено аналітично-експериментальний метод ідентифікації параметрів нелінійної математичної моделі Номото, що використовується при енергоефективному керуванні ЕРК автономних плавальних апаратів різного призначення; запропоновані частково-інваріантні до збурень енергоефективні системи керування автостерном об'єктів морської робототехніки.

Удосконалені методи підтримки прийняття рішень при забезпеченні багатоцільових засобів водного транспорту технічним обслуговуванням і ремонтом; підтримки прийняття рішень при визначенні складових елементів електрорушіїв, що є основою для синтезу різноманітних, ефективно експлуатованих складних технічних систем. Запропоновані ефективні системи стабілізації електрорушійями різної структури – із мінімальною апаратною надмірністю, з різними типами систем живлення.

Розроблено інформаційно-вимірвальне та програмно-апаратне забезпечення спеціалізованого комплексу для математичного і напівнатурного моделювання і синтезу енергоефективних систем керування електрорушійями різного типу.

Використання при розробці перспективних та удосконаленні існуючих електрорушіїв, запропонованих концепцій синтезу конструкцій і систем керування електрорушійями автономних плавальних апаратів різного призначення дозволяє оптимізувати, за визначеними критеріями, режими роботи їх систем, аргументовано оцінювати доцільність реалізації запропонованих теоретичних і практичних рішень і підвищувати їх комплексну ефективність функціонування.

***Ключові слова:* багатоцільовий автономний плавальний апарат, автоматизована система керування, електрорушійний комплекс, ефективність, експлуатація, моделювання, мінімальна апаратна надмірність, система підтримки прийняття рішень, технічне обслуговування і ремонт.**

ABSTRACT

Volianska Ya. B. Methodology of improvement in the efficiency of operation of electric propulsion complexes for multipurpose autonomous floating apparatus. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the doctor of technical science degree on the specialty 05.22.20 – operation and repair of the transport means (05 – technical sciences). – State university of infrastructure and technologies, Kyiv, 2021.

In the dissertation work the actual, important for maintenance of effective functioning of civil and military fleets of Ukraine, a scientific problem of improving of efficiency of operation of multipurpose autonomous floating apparatus (AFA) is decided. The problem is decided on the basis of synthesis of new and improvement of the existing equipment of ship electric power and control systems, development of their mathematical, hardware, information and software, in particular – automated control systems (ACS) of electric propulsion complexes (EPC) of multipurpose ships, methods of modelling their efficiency of operation and repair.

An analytical-experimental method for identifying the parameters of the nonlinear mathematical model Nomoto, which is used in energy-efficient control of the EPC of autonomous floating apparatus for various purposes, has been developed; partly invariant to disturbances energy-efficient control systems for autopilot of objects marine robotics are proposed.

Improved decision support methods for providing multipurpose means of water transport technical service and repair; decision support in determining the components of

electric propulsions, which is the basis for the synthesis of various, efficiently operated complex technical systems. Effective systems of stabilization by electric propulsions of different structure are offered – with the minimum hardware redundancy, with different types of power supply systems.

The information-measuring and software-hardware support of the specialized complex for mathematical and semi-natural modelling and synthesis of energy-efficient control systems of electric propulsions of different types is developed.

The use in the development of perspective and improvement of existing electric propulsions, the proposed concepts of synthesis of structures and control systems of electric propulsions of autonomous floating apparatus for various purposes allows to optimize, according to certain criteria, the modes of operation of their systems, argued to estimate expediency of realization of the offered theoretical and practical solutions and promote them complex efficiency of functioning.

Keywords: multipurpose autonomous floating apparatus, automated control system, electric propulsion complex, efficiency, operation, modeling, minimal hardware redundancy, decision support system, technical service and repair.

АННОТАЦИЯ

Волянская Я. Б. Методология повышения эффективности эксплуатации электродвигательных комплексов многоцелевых плавательных аппаратов. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта (05 – технические науки). – Государственный университет инфраструктуры и технологий МОН Украины, Киев, 2021.

В диссертационной работе решена актуальная, важная для обеспечения эффективного функционирования гражданского и военного флотов Украины, научная проблема повышения эффективности эксплуатации многоцелевых автономных плавательных аппаратов (АПА). Проблема решается на основе синтеза нового и совершенствования существующего оборудования судовых электроэнергетических и управляющих систем, развития их математического, аппаратного, информационного и программного обеспечения, в частности – автоматизированных систем управления (АСУ) электродвижущими комплексами (ЭРК) судов многоцелевого назначения, методов моделирования процессов управления, повышения их эффективности эксплуатации и ремонта.

Разработан аналитически-экспериментальный метод идентификации параметров нелинейной математической модели Номото, используемый при энергоэффективном управлении ЭРК автономных плавательных аппаратов различного назначения; предложены частично-инвариантные к возмущениям энергоэффективные системы управления авторулевым объектом морской робототехники.

Усовершенствованы методы поддержки принятия решений при обеспечении многоцелевых средств водного транспорта техническим обслуживанием и ремонтом; поддержки принятия решений при определении составляющих

элементов электродвигателей, что является основой для синтеза различных, эффективно эксплуатируемых сложных технических систем.

Предложены эффективные системы стабилизации электродвигателей различной структуры – с минимальной аппаратной избыточностью, с различными типами систем питания. Усовершенствован принцип построения эффективных систем управления электродвигателями автономных плавательных аппаратов на основе бесконтактного двигателя постоянного тока, который позволяет реализовать электродвигатели таких аппаратов по принципу «минимальной аппаратной избыточности», повысить надежность их функционирования и уменьшить стоимость аппаратной части без существенного ухудшения основных регулировочных и энергетических характеристик.

Получил дальнейшее развитие метод аналогий для геометрического подобия, который отличается аналитическим доказательством возможностей его применения для электродвигательных комплексов многополюсных асинхронных электродвигателей на повышенной частоте источника питания без существенного переконструирования двигателей, что позволяет достичь существенного запаса мощности и электромагнитного момента при обеспечении режимов экстренных маневров автономных плавательных аппаратов.

Усовершенствованы методы энергоэффективного управления электродвигателями автономных плавательных аппаратов, использующих управление напряжением при постоянной частоте источника питания.

Усовершенствован метод оценки энергоэффективности различных конструктивных переработок одинаковых по высоте оси вращения электродвигателей электродвигательных комплексов АПА, отличающийся их многофакторным интегрированным сравнением, что позволяет определять результирующие массогабаритные и энергетические параметры для различных частот источника питания, конструкций и активных материалов асинхронных электродвигателей электродвигателей автономных плавательных аппаратов.

Разработано информационно-измерительное и программно-аппаратное обеспечение специализированного комплекса для математического и полунатурного моделирования и синтеза энергоэффективных систем управления электродвигателями различного типа. Использование при разработке перспективных и совершенствовании существующих электродвигателей, предложенных концепций синтеза конструкций и систем управления электродвигателями автономных плавательных аппаратов различного назначения позволяет оптимизировать, по определенным критериям, режимы работы их систем, аргументировано оценивать целесообразность реализации предложенных теоретических и практических решений и повышать их комплексную эффективность функционирования.

Ключевые слова: многоцелевой автономный плавательный аппарат, автоматизированная система управления, электродвигательный комплекс, эффективность, эксплуатация, моделирование, минимальная аппаратная избыточность, система поддержки принятия решений, техническое обслуживание и ремонт.

Підписано до друку 17.04.21. Формат 60x84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 1,8.
Обл.-вид. арк. 2,0. Тираж 100 прим. Зам. № 17. Ціна договірна

Товариство з обмеженою відповідальністю фірма «Іліон».
54038, м. Миколаїв, вул. Бузника, 5/1.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1506 від 25.09.2003 р.

