

Державний університет інфраструктури та технологій

Міністерство освіти і науки України

Військова академія (м. Одеса)

Міністерство оборони України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Волянська Яна Богданівна

УДК 629.12:629.56+681.5:656.612.8

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

05 – технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів

мають посилання на відповідне джерело

_____ Я. Б. Волянська

Науковий консультант: Онищенко Олег Анатолійович, д. т. н., професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту (05 – технічні науки). – Військова академія (м. Одеса), Одеса; Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2021.

Вирішується актуальна, важлива для забезпечення ефективного функціонування цивільного і військового флотів України, наукова проблема 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) електрорушійними комплексами (ЕРК) суден багатоцільового призначення, методів моделювання процесів керування, підвищення їх ефективності експлуатації і ремонту.

Показано, що 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.

Апарати такого типу дуже затребувані з боку державних інституцій. 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. В Україні більшість АПА, призначених для цивільного застосування, закупляється за кордоном, а створення АПА для вітчизняних ВМС тільки започатковується. Вирішення цієї проблеми потребує суттєвих ресурсів, використання закритих технологій і може бути здійснено тільки за умови екстенсивного фінансування окремих напрямів досліджень.

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 можливостях, конструктивної спрощеності, швидкого налагодження виробництва.

Зазначено, що підвищення загальної ефективності експлуатації багатоцільових АПА є актуальним і проблемним комплексним науковим завданням, пов'язаним із:

- побудовою експлуатаційно-ефективних електрорушійних комплексів 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).

Відзначено, 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.

Отже, 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.

У першому розділі, проведено аналіз сфер використання, сучасного стану і типів конструкцій багатоцільових АПА, АСК їх ЕРК. Аналіз показав, що: *а)* у провідних країнах світу функціонують різноманітні АПА військового і цивільного призначення, які використовуються у різних морських технологіях; *б)* трендом розвитку сучасних морських технологій є масштабні дослідження у напрямку створення автономних безпілотних морських суден; *в)* головною тенденцією сьогодення є практичне злиття цивільного й військового секторів у галузі проектування, побудови і експлуатації морської робототехніки; *г)* багатоцільові АПА забезпечують ефективне вирішення специфічних завдань цивільного і військового флотів України.

Уточнено поняття «ефективна експлуатація» морського судна спеціального призначення при обґрунтуванні конструкції та призначення всіх систем АПА в умовах обмежень фінансів, часу, технологій, нормативно-

правових та соціально-політичних чинників, прогнозі його внеску у наявний потенціал флотів, у ціну реалізації проектів, у ключові потенційні характеристики.

Проаналізовано стан розвитку систем підтримки прийняття рішень у галузі проектного синтезу та дослідження складних технічних систем (СТС) спеціального призначення.

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

У третьому розділі проведені дослідження маршових двигунів для систем електроруху багатоцільових АПА. Визначені енергоефективні режими роботи маршового електродвигуна АПА і показано, що при їх роботі у зоні часткових навантажень (менших 60 % номінальних значень), що характерно для ЕРК АПА, знижується результуюча енергетична ефективність.

Доведено, що перспективним напрямом підвищення енергетичної ефективності є конструкційна модернізація (перепроєктування) двигунів для систем електроруху АПА з перетворювачами частоти. Основною перевагою запропонованої модернізації асинхронних двигунів для ЕРК АПА є порівняно проста, що забезпечує таку конструкційну модернізацію, технологія і можна застосовувати вкрай прості перетворювачі частоти, у яких відсутні надлишкові функціональні можливості і саме тому недорогі і технологічні у виробництві.

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, яке виключає застосування проміжних обчислень координат, дорогого і складного енкодера. При запропонованому технічному рішенні пульсації моменту на гвинті зростуть, проте вартість технічної реалізації електрорушії АПА є 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 %.

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

Удосконалено метод ідентифікації параметрів математичної моделі багатоцільового АПА, що входить до складу системи стабілізації курсу. При ідентифікації уточнюються параметри математичної моделі Номото другого порядку. Верифікацію результатів ідентифікації параметрів моделі проведена на основі порівняння результатів комп'ютерного експерименту «зігзаг 10-10» і відповідних результатів математичного моделювання.

На основі отриманих моделей пропонується метод введення у АССК багатоцільових АПА властивостей часткової інваріантності до вітрохвильових збурень, де використається непряме визначення основного збурення, відхиляючого судно від заданого курсу.

У шостому розділі запропоновані методи підтримки прийняття рішень:

а) при відборі організацій забезпечення технічного обслуговування і ремонту багатоцільового АПА; б) при синтезі конструкцій ЕРК.

Метод відбору організацій для технічного обслуговування і ремонту багатоцільового АПА ґрунтується на наступному. Обладнання багатоцільового 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.

При синтезі конструкцій ЕРК АПА використані методи рішення задач багатокритеріальної оптимізації, що передбачає наявність математичного

забезпечення, яке включає основні етапи системного аналізу у класичному вигляді – етапи постановки, побудови і вирішення.

На цій основі розроблено метод підтримки прийняття «компромісних рішень» при синтезі СТС різного призначення. Пропонується здійснювати синтез найбільш ефективною 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 вигравні ситуації, засновані на критеріях для ряду альтернативних варіантів, а оцінює компромісні варіанти, наприклад, у ході діалогу з програмним середовищем.

Представлений метод підтримки прийняття рішень дозволяє вирішувати задачі синтезу складних систем різного призначення і знаходити варіант системи, непокращуваний («оптимальний») за кількома критеріями одночасно, але з незначним погіршенням інших. Є можливість автоматизувати отримання найкращих, із множини альтернативних варіантів, параметрів для будь-якої складної системи.

У цьому розділі розроблено спеціалізований моделюючий комплекс для проведення експериментальних досліджень електрорушіїв багатоцільових АПА.

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 керування, вимірювання енергетичних і динамічних характеристик ЕРК різного типу. Використання запропонованих і введених у експлуатацію дослідницько-лабораторних стендів дозволило підвищити ефективність процесу навчання судових фахівців і проводити широкий спектр споріднених досліджень.

Розроблено інформаційно-вимірювальне та програмно-апаратне забезпечення спеціалізованого комплексу для математичного і напівнатурного моделювання систем керування електрорушійними різного

типу. Використання при розробці перспективних та удосконаленні існуючих електрорушіїв запропонованих концепцій синтезу конструкцій і систем керування ЕРК АПА, дозволяє оптимізувати, за різними критеріями, режими роботи їх систем керування, аргументовано оцінювати доцільність реалізації запропонованих теоретичних і практичних рішень.

Ключові слова: багатоцільовий автономний плавальний апарат, автоматизована система керування, електрорушійний комплекс, енергоефективність, 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.

The actual, important for maintenance the effective functioning of the civil and military fleets of Ukraine, the scientific problem of improving the 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 modeling their efficiency of operation and repair.

It is shown that the expansion of commercial, research, rescue and search operations, special maritime operations, solving urgent problems of environmental safety, protection and monitoring of the aquatic environment, conducting various anti-terrorist and preventive measures, are determined by a significant increase in Ukraine's needs for special water resources. transport – objects of marine robotics, in particular, small (deadweight up to 500 kg) with an autonomous radius of up to 10 km, unmanned autonomous floating apparatus (APA).

Apparatus of this type are in great demand by government institutions. It is this demand for practice that requires a significant increase in the fleet, types, nomenclature and integrated use of autonomous small unmanned marine mobile objects, including multipurpose. In Ukraine, most AFAs intended for civilian use are purchased abroad, and the creation of AFAs for the domestic Navy is just beginning. The solution to this problem requires significant resources, the use of

closed technologies and can be done only with extensive funding for certain areas of research.

At the current level of development of science and technology of Ukraine, the problem of providing it with efficiently operated AFA is limited by scientific contradiction: guaranteed performance of multipurpose AFA main technological task is impossible while maintaining high energy efficiency, controllability, stabilization of local systems, environmental friendliness, safety and versatility, advanced functionality, design simplification, rapid adjustment of production.

It is noted that increasing the overall efficiency of operation of multipurpose AFA is an urgent and problematic complex scientific task related to:

- construction of operational-efficient electric propulsion complexes with the choice of the type of their propulsions and energy conversion systems;

- determination of the structure of EPC stabilization and control systems with minimal hardware redundancy, according to the principles of «compromise» (depending on the target technological task and purpose of the apparatus) selection of elements of the complex;

- ensuring controllability with simultaneous expansion of the functionality of the EPC, justification of material and time costs, the use of existing material and technical base of components.

This scientific problem is complicated by the fact that it is insufficiently formalized, that there are a variety of principles for building the basic elements of multipurpose AFA (propulsion and power plants, propulsion systems, traffic stabilization systems and other systems), which are features of multipurpose AFA technical service and repair.

It is noted that the solution of the scientific problem decided in the dissertation is the need to increase the overall efficiency of operation of multipurpose AFA and directly related to the design and configuration of EPC configurations, providing them with quality technical service and repair, depends on the main tasks AFA. This is what determines the composition of EPC and other technical systems of multipurpose AFA.

Consequently, the improvement of the methodology for improving the efficiency of multipurpose AFA and their EPC, which is based on preliminary scientific substantiation and determination of the necessary tactical and technical characteristics (TTC) of EPC of such AFA, on improving the concept of their design and synthesis, construction and further effective technical service and repair, is an urgent scientific problem, including for the functioning of the Ukrainian Navy and its civilian fleet.

In the first section, an analysis of the areas of use, current status and types of structures of multipurpose AFA, ASC their EPS. The analysis showed that: *a)* in the leading countries of the world there are various AFAs of military and civilian use, which are used in various marine technologies; *b)* the trend of development of modern marine technologies is large-scale research in the direction of creating autonomous unmanned ships; *c)* the main trend today is the practical merger of civil and military sectors in the field of design, construction and operation of marine robotics; *d)* multipurpose AFA provide effective solution of specific tasks of the civil and military fleets of Ukraine.

The concept of «effective operation» of a special purpose ship is substantiated in substantiating the design and purpose of all AFA systems in terms of financial, time, technology, regulatory and socio-political factors, forecasting its contribution to the existing fleet potential, project implementation costs, key potential characteristics.

The state of development of decision support systems in the field of project synthesis and research of complex technical systems (CTS) of special purpose is analyzed.

In the second section the limitations in the used theoretical methods are defined, the dissertation subject, its frameworks are substantiated; the technological map of research is developed.

In the third section researches of marching electric motors for systems of electromotive of multipurpose AFA are carried out. The energy-efficient modes of operation of the AFA marching electric motor are determined and it is shown that

when they work in the zone of partial loads (less than 60 % of nominal values), which is typical for the AFA EPS, the resulting energy efficiency decreases.

It is proved that a promising direction of energy efficiency improvement is structural modernization (redesign) of motors for AFA electromotive systems with frequency converters. The main advantage of the proposed modernization of induction motors for EPS AFA is relatively simple, which provides such structural modernization, technology and we can use extremely simple frequency converters, which have no redundant functionality and therefore inexpensive and technological in production.

In the fourth section the development and research of contactless valve electric drive with minimal hardware redundancy for the multipurpose AFA's electric propulsion is carried out. Mathematical model of AFA electric propulsion synthesized; developed electric motors with minimal hardware redundancy: offers a simple technical solution based on a contactless DC motor, which eliminates the use of intermediate coordinate calculations, expensive and complex encoder. With the proposed technical solution, the ripple of the torque on the screw will increase, but the cost of technical implementation of the electric propulsion AFA is significantly lower. It is expected: *a*) reduction of the cost of EPS construction in small-scale production by 18–25 %; *b*) reduction of mass and size indicators of the control board by 5–7 %; *c*) increase the reliability of the structure due to the use of fewer components by 7–14 %.

The fifth section proposes the sequence of synthesis of the automated course stabilization system (ACSS) multipurpose AFA. Mathematical models of the electromotive system multipurpose AFA and its marching electric motor as control objects are synthesized.

The method of identification of parameters of the mathematical model of multipurpose AFA, which is a part of the course stabilization system, has been improved. At identification parameters of mathematical model of Nomoto of the second order are specified. Verification of the results of identification of model parameters was carried out on the basis of comparison of results of computer experiment «zigzag 10-10» and corresponding results of mathematical modeling.

Based on the obtained models, a method of introducing into ASCC multipurpose APA properties of partial invariance to wind-wave disturbances is proposed, where indirect determination of the main disturbance deviating the ship from the set course is used.

In the sixth section, methods of decision support are proposed: *a)* in the selection of organizations for technical service and repair of multipurpose AFA; *b)* in the synthesis of EPS structures.

The method of selection of organizations for technical service and repair of multipurpose AFA is based on the following. Multipurpose equipment is serviced with special requirements and restrictions. The task of selecting under such conditions the «optimal» service provider of technical service and repair is proposed to be decided on the basis of simultaneous, reasoned and compared accounting of all selected for analysis parameters and characteristics of suppliers. The use of fuzzy set theory is proposed to evaluate and compare different possible solutions.

In the synthesis of AFA EPS structures, methods for solving multicriteria optimization problems were used, which presupposes the presence of mathematical software, which includes the main stages of system analysis in the classical form – the stages of formulation, construction and solution.

On this basis, a method of supporting the adoption of «compromise decisions» in the synthesis of STS for various purposes has been developed. It is proposed to synthesize the most effective system for a person is a decision making parameters and constraints of the system on the basis of integrated quality criteria and using the Edgeworth-Pareto principle. In the synthesis process, a person is a decision making does not use individual winning situations based on criteria for a number of alternatives, but evaluates trade-offs, for example, in dialogue with the software environment.

The presented method of decision support allows to solve the problem of synthesis of complex systems for different purposes and to find a variant of the system that is not improved («optimal») by several criteria simultaneously, but

with a slight deterioration of others. It is possible to automate obtaining the best, from many alternatives, parameters for any complex system.

In the seventh section, a specialized modeling complex was developed for conducting experimental studies of electric propulsions multipurpose AFA.

A design has been proposed, a specialized modeling stand has been designed and created to study the efficiency of AFA EPS control systems, designed to test various algorithms and control principles in the laboratory, to measure energy and dynamic characteristics of different types of EPS. The use of the proposed and put into operation research and laboratory stands allowed to increase the efficiency of the process of training ship specialists and to conduct a wide range of related research.

The information-measuring and software-hardware support of the specialized complex for mathematical and semi-natural modeling of control systems of electric propulsions of different type is developed. The use in the development of promising and improvement of existing electric propulsions proposed concepts of synthesis of structures and control systems EPS AFA, allows to optimize, according to various criteria, the modes of operation of their control systems, reasonably assess the feasibility of the proposed theoretical and practical solutions.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT

Праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації
Works, in which the main scientific results of the dissertation are published

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. Андрищенко, О. А. Формирование выходного напряжения ТПН, инвариантного фазе тока нагрузки / О. А. Андрищенко, 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. Волянський, С. М. Особливості побудови автоматичних систем керування рухом об'єктів морської робототехніки / С. М. Волянський, **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. Волянський // 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. Голяков, 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., Волянський 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. **Волянская, Я. Б.** Уточнение параметров математической модели трехфазного асинхронного электродвигателя системы электродвижения автономного плавательного аппарата / Я. Б. Волянская, С. М. Волянский, О. А. Онищенко / Морские интеллектуальные технологии. – 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**)

**Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації і які
додатково відображають наукові результати дисертації**

**Proceedings certifying approbation of the materials of the dissertation and
which additionally reflect the scientific results of the dissertation**

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. A simple technique for identifying vessel model parameters / V. V. Golikov, V. A. Golikov, **Ya. Volyanskaya**, O. Mazur, O. Onishchenko // 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 экспериментальных исследований эффективности нейронечетких регуляторов электроприводов постоянного тока / В. С. Блинцов, С. В. Блинцов, **Я. Б. Волянская**, С. М. Волянский, Д. В. Костенко // 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 // Проблемы автоматизации 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. Волянський // 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. Волянський // 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 червня–02 липня 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 // МРР&О – 2020: матеріали II Міжнародної 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.

У опублікованих у співавторстві наукових працях, особисто автору належать наступні результати.

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, [1]:

– *аналіз процесів перемикання обмотки двигуна; виявлення режимів, що забезпечують обмеження викидів струму і моменту; аналітичне визначення можливостей енергозбереження.*

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

– запропоновано енергетично-ефективний спосіб керування напругою, заснований на синхронізації струму; аналіз результатів; загальні висновки.

3. **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, [4]:

– запропоновано конструкцію і розроблено методуку метрологічної атестації моментоміру; розрахунок і оцінка похибок тарированого моменту.

4. 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, [5]:

– аналіз систем управління енергосберегаючим електроприводом; визначення принципів побудови різномісних регуляторів систем управління морських рухомих об'єктів.

5. 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, [6]:

– розробка та інтеграція каналу вимірювання споживаної потужності у лабораторний стенд для натурних досліджень регуляторів електрорушійних комплексів.

6. 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, [7]:

– удосконалення математичних моделей різних типів електроприводів, що дозволяють оптимізувати за різними критеріями робочі процеси при проектуванні та експлуатації електрорушійних комплексів.

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

– концепція побудови апаратно простого цифрового вимірювача частоти обертання; методика метрологічної атестації вимірювача; доведення можливості застосування вимірювача у системах управління різного призначення підводних апаратів.

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

– принцип побудови системи управління рушійно-стерновим комплексом підвищеної якості підводного апарата; експериментальне доведення ефективності використання адаптивних регуляторів підводного апарату.

9. Волянський, С. М. Особливості побудови автоматичних систем керування рухом об'єктів морської робототехніки / С. М. Волянський, **Я. Б. Волянська** // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2016. – Вып. 23 (99). – С. 39–44, [10]:

– формулювання вимог до якості систем керування горизонтальним рухом об'єктів морської робототехніки; визначення параметрів, зміна яких суттєво діє на підвищення ефективності функціонування систем керування рухом об'єктів морської робототехніки.

10. 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, [11]:

– отримання системи математичних виразів для розрахунку пускових ділянок механічної та електромеханічної характеристик асинхронних електроприводів об'єктів морської робототехніки.

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

– визначення параметрів регуляторів різних типів; визначення відмінностей систем керування при застосуванні регуляторів у електрорушійних комплексах спеціальних плавальних засобів.

12. **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, [14]:

– удосконалення процедури розрахунку сигналу управління, пропорційного головному збуренню, що діє на корпус судна; моделювання системи управління курсом судна; аналіз результатів.

13. **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, [15]:

– удосконалення процедур розрахунку різномірних показників у системах підтримки прийняття рішень для забезпечення технічного обслуговування і ремонту суден подвійного призначення.

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

– уточнення методики підтримки прийняття рішень при визначенні можливих комбінацій елементів різних складних технічних систем.

15. **Volyanskaya, Ya.** Tasks of control system's automation for multi purpose dual-duty vessels / Ya. Volyanskaya, S. Volyanskiy / Slovak international scientific journal. – Bratislava. – 2020. – № 41. – Vol. 1. – P. 33–38, [17]:

– удосконалення і верифікація моделі просторового руху; визначення можливості застосування моделі у дослідженнях систем електроруху автономних плавальних апаратів подвійного призначення.

16 **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**), [18]:

– пропонування, створення, випробування і впровадження конструкції спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження ефективності функціонування систем електроруху об'єктів морської робототехніки.

17. **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**), [19]:

– удосконалення схемотехнічних рішень з побудови електрорушіїв плавальних апаратів з безконтактним двигуном постійного струму; пропонування виключення проміжних програмно-апаратних перетворень координат; аналіз результатів.

18. 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**), [20]:

– математичний опис режимів роботи системи ТПН-АД; доведення можливості зменшення втрат потужності; розробка системи мінімізації втрат; загальні висновки.

19. **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**), [21]:

– удосконалення методики визначення енергетично-ефективних режимів роботи маршових асинхронних електродвигунів автономних плавальних апаратів.

20. **Волянская, Я. Б.** Уточнение параметров математической модели трехфазного асинхронного электродвигателя системы электродвижения автономного плавательного аппарата / Я. Б. Волянская, С. М. Волянский, О. А. Онищенко / Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 4 (38). – Т. 3 – С. 133–138. (**Web of Science**), [22]:

– удосконалення методики врахування у математичних моделях залежностей зміни насичення ланцюга намагнічування, опору ротора у функції ковзання, а також втрат у сталі для двигунів електрорушіїв автономних плавальних апаратів.

21. **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**), [23]:

– доведення можливості підвищення енергетичних показників загальнопромислових електродвигунів; обґрунтування їх укорочення; визначення енергетичних характеристик модернізованих двигунів при використанні в електрорушійях автономних плавальних апаратів.

22. 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**), [25]:

– пропонування мікропроцесорної системи підпорядкованого управління з використанням різних регуляторів (струму, швидкості, положення); доведення можливості точного відтворення заданої траєкторії руху без додаткових операцій у підході механізму до заданої точки.

23. **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**), [26]:

– моделювання системи стабілізації; визначення можливостей оцінювання впливу збурень на курс судна з метою формування позитивного зворотного зв'язку у систему.

24. 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, [27]:

– пропонування використання конструкції, кінематично не пов'язаної з ротором і нерухомою основою; удосконалення конструкції пристрою для виміру обертового моменту.

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

– пропонування використання випробувань типу «зигзаг» у удосконаленій моделі морського судна.

26. **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, [29]:

– спрощення окремих складових математичної моделі електропривода; методика налаштування контурів струму й швидкості; моделювання; аналіз результатів.

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

– розробка принципової схеми і окремих елементів спеціалізованого моделюючого комплексу; методика застосування комплексу для дослідження стаціонарних і динамічних режимів електрорушіїв.

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

– аналіз характеристик різних типів двигунів і можливостей їх застосування у підводних апаратах; обґрунтування раціонального варіанту синтезу конструкції двигуна баророзвантаженого виконання.

29. **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, [32]:

– синтез нечіткого регулятора вертикального маршового рушія, що дозволяє керування рухом і орієнтацією підводного апарату; визначення змін швидкості апарату; аналіз результатів.

30. **Волянская, Я. Б.** Основные задачи синтеза систем автоматического управления движением подводных аппаратов в условиях неопределенности /

Я. Б. Волянська, С. М. Волянський // Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф., Миколаїв, 24–25 квітня 2013 р. – Миколаїв, 2013. – С. 158–161, [33]:

– обґрунтування задачі синтезу систем автоматичного керування плоским і просторовим рухом підводних апаратів при наявності течії, хитами, зміни параметрів водного середовища.

31. Волянська, Я. Б. Моделювання горизонтального прямолінійного руху підводного апарата / Я. Б. Волянська, С. М. Волянський // Інформатика. Культура. Техніка: матеріали Українсько-німецької конф., Одеса, 30 червня–02 липня 2016 р. – Одеса, 2016. – С. 88–89, [34]:

– розробка математичної моделі і оцінки точності процесів моделювання горизонтального прямолінійного руху підводного апарата; визначення динамічних характеристик руху підводного апарата при різних потужностях маршових електродвигунів.

32. 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, [35]:

– аналіз джерел інформації; виокремлення методів вирішення задач керування спеціалізованими рухомими морськими об'єктами.

33. Волянська, Я. Б. Система електродвиження автономного плавательного 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, [36]:

– обґрунтування можливостей розробки енергоефективних систем електроруху; визначення особливостей функціонування електрорушіїв автономних плавальних апаратів при управлінні напругою при незмінній частоті живлення.

34. 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, [38]:

– аналіз джерел інформації; визначення перспектив подальшого розвитку багатоцільових суден допоміжного флоту.

35. 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 Міжнародної наук.-практ. морської конференції каф. СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, квітень 2020 р. – Одеса, 2020. – С. 119–123, [39]:

– удосконалення елементів системи підтримки прийняття «компромисних рішень» для синтезу складних систем різного призначення.

36. 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 ХХ наук.-техн. конф., ДНДІ ВС ОВТ, 03–04 вересня 2020 р. – Чернігів, 2020. – С. 52–54, [40]:

– узагальнення і аналіз джерел інформації; визначення перспективних розробок у області створення і застосування автономних плавальних апаратів подвійного призначення.

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

– розділи, присвячені алгоритмізації представлення і опису структури науково-дослідницьких проектів і рішень.

38. 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, [42]:

– розділи, присвячені функціональному моделюванню і оптимізації електромеханічних систем різного призначення.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	36
ВСТУП	38
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ БАГАТОЦІЛЬОВИХ АВТОНОМНИХ ПЛАВАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ЇХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	52
1.1 Передумови, термінологія, аналіз можливостей створення та вимоги до автономних багатоцільових суден	52
1.2. Визначення поняття «ефективна експлуатація» багатоцільового морського судна	66
1.3 Критичний аналіз сучасних і перспективних автоматизованих систем керування для багатоцільових АПА	75
1.4 Науково-технічні проблеми розвитку систем керування та задачі автоматизації багатоцільових автономних плавальних апаратів	78
1.5 Стан розвитку систем підтримки прийняття рішень у галузі проектного синтезу та дослідження складних технічних систем багатоцільового призначення	84
1.6 Висновки до розділу 1	90
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЗАСТОСОВАНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ МЕТОДІВ, АЛГОРИТМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ СИНТЕЗУ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМ АПА І ЗАГАЛЬНА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	92
2.1 Особливості процесів моделювання руху надводних морських транспортних засобів	92
2.1.1. Спрощена <i>3DoF</i> модель горизонтального руху АПА	98
2.1.2. Стабілізація руху АПА при його русі уперед	100
2.2 Теоретичне вирішення проблем синтезу високоякісних систем керування рухом АПА за допомогою електрорушіїв	102
2.3 Алгоритмізація процесів синтезу систем керування рухом АПА ...	111

2.4 Математичний опис вирішення поставленої проблеми підвищення ефективності експлуатації ЕРК багатоцільових АПА	113
2.5 Висновки до розділу 2	119
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАРШОВИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОРУХУ БАГАТОЦІЛЬОВИХ АПА	120
3.1 Визначення енергоефективних режимів роботи маршового електродвигуна автономного плавального апарата	120
3.1.1. Аналіз можливостей морських транспортних систем електроруку і тенденції їх розвитку	120
3.1.2. Особливості роботи маршових АД у зоні часткових навантажень	122
3.2 Оцінка можливостей зниження втрат потужності при роботі маршового трифазного АД у системі електроруку АПА	123
3.2.1. Уточнення параметрів моделі трифазного АД системи електроруку АПА	127
3.2.2. Верифікація параметрів математичної моделі АД	133
3.2.3. Особливості побудови системи керування маршовим АД системи електроруку АПА	135
3.3 Підвищення енергетичних показників трифазних АД пропульсивних комплексів АПА	137
3.3.1. Конструкційна модернізація (перепроєктування), як перспективний напрям підвищення енергетичної ефективності АД АПА	137
3.3.2. Попередня оцінка можливостей застосування трифазних загальнопромислових АД на підвищеній частоті джерела живлення ...	141
3.3.3. Аналітичні залежності і теоретичне обґрунтування послідовності порівняння основних характеристик модернізованих АД	144
3.3.4 Результати аналізу порівнюваних асинхронних електродвигунів	

електрорушів АПА	149
3.3.5. Енергетична оптимізація електрорушій використанням методів повільного регулювання напруги АД	154
3.4 Висновки до розділу 3	157
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З МІНІМАЛЬНОЮ АПАРATНОЮ НАДМІРНІСТЮ ДЛЯ ЕЛЕКТРОРУШІЯ БАГАТОЦІЛЬОВОГО АПА	161
4.1 Сучасний стан, передумови розвитку та вимоги до безконтактних вентильних електроприводів	161
4.2 Синтез математичної моделі БДПС електрорушій АПА	164
4.3 Розробка електрорушій з мінімальною апаратною надмірністю електропривода для багатоцільового АПА	167
4.4 Синтез системи електроруху на базі БДПС багатоцільового АПА ..	173
4.4.1. Розробка спрощеної математичної моделі електропривода з мінімальною апаратною надмірністю на основі вентильного БДПС для системи електроруху багатоцільового АПА	175
4.4.2. Моделювання вентильного електропривода на основі БДПС з мінімальною апаратною надмірністю для системи електроруху багатоцільового АПА.....	180
4.5 Висновки до розділу 4	186
РОЗДІЛ 5. СИНТЕЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ АСК КУРСОМ БАГАТОЦІЛЬОВОГО АПА	188
5.1 Синтез математичних моделей системи електроруху багатоцільового АПА і її маршового двигуна як об'єктів керування ...	188
5.2 Визначення вимог щодо АСК курсом, необхідних для забезпечення реалізації можливостей підвищення точності і стабілізації багатоцільового АПА на курсі	196
5.3 Розробка методу ідентифікації параметрів моделі багатоцільового АПА, що входить до складу системи стабілізації курсу	200

5.3.1. Метод оцінки параметрів нелінійної моделі Номото другого порядку	201
5.3.2. Побудова розрахункової математичної моделі для верифікації результатів ідентифікації параметрів багатоцільового АПА у системі стабілізації курсу	203
5.3.3. Результати моделювання	206
5.4 Розробка методу введення у АСК курсом багатоцільового АПА властивостей часткової інваріантності до вітро-хвильових збурень	208
5.5 Висновки до розділу 5	218
РОЗДІЛ 6. ПІДТРИМКА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ТЕХНІЧНОМУ ОБСЛУГОВУВАННІ І РЕМОНТІ БАГАТОЦІЛЬОВОГО АПА, ПРИ СИНТЕЗІ КОНСТРУКЦІЙ ЙОГО ЕЛЕКТРОРУШІВ	220
6.1 Розробка методу відбору організацій для технічного обслуговування і ремонту багатоцільового АПА	220
6.1.1. Забезпечення багатоцільового АПА технічним обслуговуванням і ремонтом	220
6.1.2. Застосування методів теорії нечітких множин при обранні «найкращого» підприємства для забезпечення ТОіР багатоцільового АПА	223
6.2 Загальні методи рішення задач багатокритеріальної оптимізації при синтезі конструкцій СТС	234
6.2.1. Метод підтримки прийняття «компромісних рішень» при синтезі складних технічних систем різного призначення	238
6.3 Висновки до розділу 6.....	251
РОЗДІЛ 7. РОЗРОБКА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО МОДЕЛЮЮЧОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОРУШІВ БАГАТОЦІЛЬОВИХ АПА	253
7.1 Розробка навчально-дослідницького засобу «Стенд випробувальний СВ-1» у складі спеціалізованого моделюючого	

комплексу.....	253
7.1.1. Розробка датчика виміру частоти обертання.....	259
7.1.2. Експериментальні дослідження динамічних характеристик цифрового тахогенератора	264
7.1.3. Оцінка похибок вимірювання тарування моменту і моментоміру	267
7.2 Приклади синтезу АСК рухом АПА та їх експериментальні дослідження за допомогою СМК.....	274
7.2.1. Моделювання просторового руху АПА у системі <i>Simulink</i>	274
7.2.2. Експериментальні дослідження різних типів регуляторів у системі керування частотою обертання електрушієм постійного струму за допомогою СМК	282
7.2.3. Дослідження системи енергозберігаючого керування вертикальним рухом АПА за допомогою СМК.....	285
7.2.4. Розробка та дослідження АСК електрорушіями при горизонтальному прямолінійному русі АПА з різними типами регуляторів.....	288
7.3 Висновки до розділу 7.....	293
ВИСНОВКИ.....	295
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	299
Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	331
Додаток Б. Комплект документації по метрологічній атестації навчально-дослідницького засобу «Стенд випробувальний СВ-1»	344
Додаток В. Програмна реалізація синхронного фільтру «ковзне середнє».....	366
Додаток Д. Фотографії спеціалізованого моделюючого комплексу.....	368

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ACTUV – Anti-submarinewarfare Continuous Trail Unmanned Vessel
- AUV – Autonomous underwater vehicle
- IFR – International Federation of Robotics
- MRUUV – Multi Mission Reconfigurable Unmanned Undersea Vehicle
- ROV – Remotely operated vehicle
- АД – асинхронний двигун;
- АЕП – автоматизований електропривод;
- АСК – автоматизована система керування;
- АПА – автономний плавальний апарат;
- АТЗЗ – автономний транспортний засіб із зануренням
- БАД – баророзвантажений асинхронний двигун;
- БДПС – безконтактний двигун постійного струму;
- БПА – безпілотний підводний/плавальний апарат;
- ГГ – гребний гвинт;
- ГЕД – гребний електродвигун;
- ГРЩ – головний розподільний щит;
- ДПР – датчик положення ротора;
- ЕР, ЕРК – електрорушій, електрорушійний комплекс;
- ІС – інформаційна система;
- ІКС – інформаційно-керуюча система;
- КЗЗ – канал зворотного зв'язку;
- КП – координатні перетворення;
- КС – комунікаційна система;
- КТ – кабель-трос;
- МБК – морський безпілотний комплекс
- МНК – метод найменших квадратів;
- МРС – магніторушійна сила;
- МРО – морський рухомий об'єкт;

- НПА – ненаселений підводний/плавальний апарат;
НР – нечіткий регулятор;
НСК – нечітка система керування;
ОК – об'єкт керування;
ОПР – особа, що приймає рішення;
ПА – підводний/плавальний апарат;
ПК – пропульсивний комплекс;
ПП – подвійне призначення;
ПСК – підсистема керування;
ПЗЗ, ВЗЗ – позитивний/від'ємний зворотний зв'язок;
РСАК – розімкнена система автоматичного керування;
РП – рушійний пристрій;
РСК, ЕРК – рушійно-стерновий комплекс; електрорушійний комплекс
СВ – стенд випробувальний;
СЕУ – суднова енергетична установка;
СК – система керування;
СКОТ – синусно-косинусний обертовий трансформатор
СМК – спеціалізований моделюючий комплекс;
СП – спеціальне призначення;
СПА – самохідний підводний апарат;
ССП – судно спеціального призначення;
СППР – система підтримки прийняття рішень;
СПРК – система з підпорядкованим регулюванням координат;
СТС – складна технічна система;
ТО і Р – технічне обслуговування і ремонт
ТП – технологічний процес;
ФП – функція приналежності;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

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 можливостях, 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. Голіков, А. Д. Піпченко, А. С. Мальцев, Э. Кавалло, Р. Herman, 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 комплексу 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 використовувались такі методи і теорії: числові методи розв'язання систем нелінійних диференціальних 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 переслідуються 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 уведенням 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 ТО і Р і заснований на адитивному використанні методів кваліметрії, експертних оцінок і лінгвістики, що дозволяє підвищити ефективність ТО і Р багатоцільових засобів водного транспорту.

4. Удосконалено процедуру синтезу ЕРК на основі безконтактного двигуна, який 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 регулювальних 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. Отримало подальший розвиток використання методу 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 багатофакторним 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 судових 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 судових 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

різномісних 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 370 сторінок, 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).

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ БАГАТОЦІЛЬОВИХ АВТОНОМНИХ ПЛАВАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ЇХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

1.1 Передумови, термінологія, аналіз можливостей створення та вимоги до автономних багатоцільових суден спеціального призначення

Багатоцільовий АПА – це транспортний засіб, особливим чином пристосований для виконання низки технологічних функцій, які зазвичай здійснюються декількома вузькоспеціалізованими плавальними апаратами. Багатоцільові АПА створюються з метою універсалізації застосування в різних кліматичних умовах і обстановці (соціальної, політичної, техногенної та ін.), Для більш гнучкої та економічної експлуатації, вирішення різноманітних і нестандартних задач, при нестачі часу на проведення спецоперацій та інших обставинах, суттєво ускладнюючих застосування вузькоспеціалізованих морських транспортних засобів.

У теперішній час провідні країни світу такі, як США, Великобританія, Норвегія, Японія, Китай, Ірландія, а також і Росія, мають різноманітні плавальні апарати військового і цивільного призначення, які використовуються у різних морських технологіях: для робіт на шельфі (на глибинах недосяжних для водолазів), вирощування морських культур (риби, молюсків, перлин), добутку коралів, екологічних, антитерористичних, пошукових, ремонтно-рятувальних робіт тощо [45, 58].

Але за ствердженням швейцарського економіста професора Клауса Шваба, засновника і незмінного президента Всесвітнього економічного форуму в Давосі з 1971 року, людство перебуває на порозі IV промислової революції, яка повністю змінить наш спосіб життя, працю і комунікації [116]. Поява новітніх технології у різноманітних сферах існування людства вже призвела до своєрідних проривів у таких найсучасніших суміжних галузях,

як штучний інтелект, робототехніка, Інтернет Речей, автономний транспорт і доставка, 3D-друк, нанотехнології, матеріалознавство, нові і поновлювані джерела енергії, квантові комп'ютери тощо. Перелічені технологічні новації, також, суттєво впливають і на морську галузь, а саме на комерційне судноплавство, на розвиток сил та засобів військово-морських флотів, на зміну стратегії їх застосування, на сектор, якій пов'язаний з використанням біоресурсів океану й т. і.

Другим трендом напрямку розвитку сучасних морських технологій слід вважати все більш активні та масштабні дослідження у напрямку створення автономних безпілотних морських платформ (суден), які являють собою своєрідну наступну сходинку еволюції у судноплавстві. Поява у найближчому майбутньому серійного зразку суден типу *Smart Ship*, повинна стати проривом у галузі управління, комерційної та технічної експлуатації флотів.

У щорічному докладі за 2018 рік *International Federation of Robotics IFR* (Міжнародна федерація робототехніки) вказується, що частка професійних сервісних роботів (*professional service robot*) та роботизованих систем (*robot system*), яка використовується у напрямку «Захисні програми» («*Defense applications*») буде постійно збільшуватися (рис. 1.1) [124, 244].

Галузь їх використання дуже широка: від використання у дуже важливих для сучасності системах захисту акваторії морського порту, морських нафто-газодобувних платформ, пунктів базування військових флотів, виявлення та відлякування піратів (з дотриманням правових норм), протидії незаконній міграції, вилову риби та морепродуктів, наркотрафіку, екологічного моніторингу до використання у системі технічного обслуговування та ремонту. Наприклад, це: *mini surveyors* (огляд місць підвищеної небезпеки: гвинто-стерновий комплекс, корпус, кінгстоні ящики, колектори котлів, цистерні, моніторинг стану корпусу та ін.); *sniffers* – вловлювання та реєстрація шкідливих викидів двигунів внутрішнього згоряння; *maintainers* – надання допомоги екіпажу під час проведення вогневих робіт на судні, чистка підводної частини корпусу та інші небезпечні роботи і багато інших застосувань.

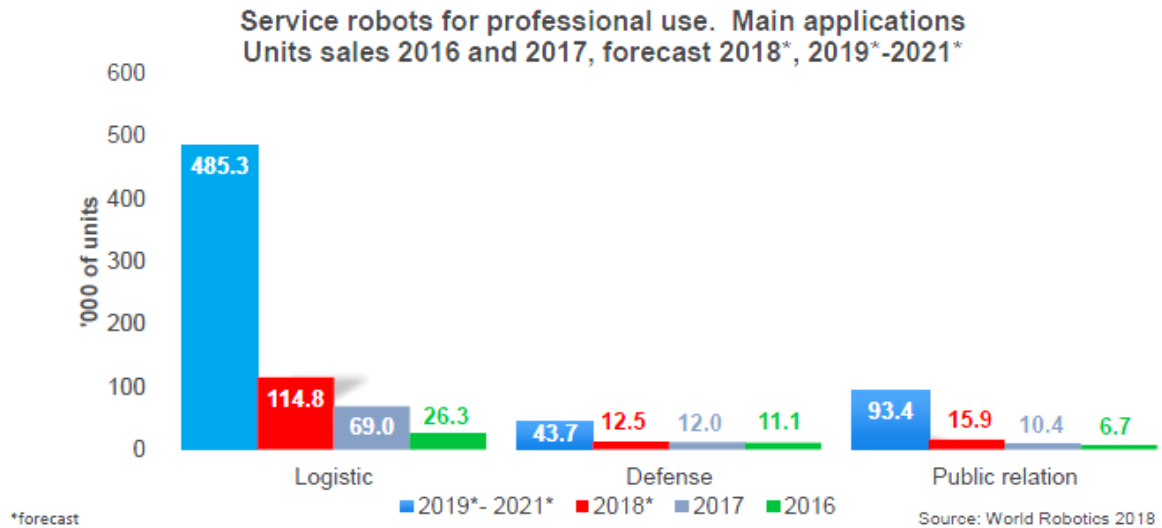


Рисунок 1.1 – Сервісні роботи для професійного використання. Основні програми продаж у 2016 р. та 2017 р., прогноз на 2018, 2019–2021 р. р.

Головною тенденцією сьогодні є практичне злиття цивільного й військового секторів у галузі проектування і побудови морської робототехніки. Світовим лідером у виробництві цивільної морської робототехніки є Японія. За загальною кількістю морських роботів Японія значно випереджає Німеччину і США. При цьому у Європі цей показник (2017 р.) складає – 80, в Америці – 68, в Азії – 47 одиниць [158].

У даний час для безпілотних морських апаратів (БМА – морський дрон) практично не усталилася термінологія. Існує багато назв і термінів, які у тій чи іншій мірі відображають функціональні призначення безпілотного апарата. Загалом, безлюдні (безпілотні, ненаселені) морські апарати, використовувані цивільним флотом і військово-морськими силами (ВМС) розподіляють на телекеровані і автономні. Найчастіше використовуються такі назви та аббревіатури.

АНПА – автономний підводний апарат (*AUUV – Autonomous Unmanned Undersea Vehicle*);

RC Submarine – телекерований безлюдний підводний човен;

ОСЗМ – одноразові системи знищення мін (*OSMDWS – One-Shot Mine Disposal Weapon System*);

НПА – ненаселений/безлюдний підводний апарат (*UUV – Unmanned Undersea Vehicle*);

ТНА, ТНПА – дистанційно-керований ненаселений/безлюдний апарат (підводний);

АПА – автономний плавальний апарат;

ВТНПЧ – великий телекерований ненаселений/безлюдний підводний човен великої тоннажності (*LDUUV – Large Displacement Unmanned Undersea Vehicle*);

БПА – безпілотний підводний апарат/дрон/робот (*UUV – Unmanned underwater vehicle*) і багато інших назв і аббревіатур.

По виду корпусу і форм-фактору розрізняють морські дрони, близькі за конструкцією до підводних човнів, батискафів різного типу, глайдерів, торпед, роботизованих спливаючих капсул, гібридних апаратів, які суміщають надводні та підводні функції і які, інколи, можуть літати, тобто виконувати функції безпілотного літаючого апарата (БПЛА).

За принципом керування безпілотні морські апарати класифікуються на телекеровані (кабелем, акустичному, радіо або іншому каналу), на автономні плавальні апарати (функціонуючі за програмою, із бортовим штучним інтелектом, постановкою завдань від оператора).

За мобільністю безпілотні апарати класифікуються на стаціонарні та мобільні. За призначенням морські роботи можна розділити на:

– пошукові та розвідувальні пристрої (обстеження морського дна і інших об'єктів). Вони можуть діяти автономно або у режимі телекерування. Поширене технологічне завдання – протидія мінуванню, виявлення, класифікація і локалізація мін;

– ударні роботи, призначені для боротьби з ворожими кораблями і підводними човнами. До числа ударних відносяться роботизовані підводні торпеди, які автоматично розпізнають корабель заданого класу і його атакують (за командою оператора або автономно);

– підводні робокапсули «дрони-закладки», що знаходяться під водою в оперативному чергуванні. За сигналом «прокидаються», діючи під водою (над водою після спливання), активізуючи деяке корисне навантаження.

Відомі розробки АПА, які призначені для знищення або пошкодження лише певної морської техніки (корабля заданого класу або конкретної мети).

Існують перспективні розробки АПА, у завдання яких входить протидія мінуванню, виявлення, класифікація і локалізація мін, йдуть розробки ударних підводних роботів з ядерним озброєнням. На замовлення власних ВМС (США, Західна Європа, Китай, Росія) розробляються різні типи роботизованих підводних мін-камікадзе, брандерів різного типу.

За функціональним призначенням багато БМА призначено для розвідки, обстеження морського дна і підводних і надводних об'єктів. Існують апарати, які у необхідний момент активують корисне навантаження (наприклад, робокапсули, створювані на замовлення *DARPA* – керування перспективних дослідницьких проектів Міністерства оборони США, що відповідає за розробку нових технологій для використання в інтересах збройних сил).

Визначимо основні тенденції та перспективні розробки в області створення і застосування АПА.

США, Китай і Росія активно створюють автоматизовані автономні підводні системи моніторингу, раннього інформування, виявлення і класифікування, розташовуючи їх у світовому океані. Відомо, що вже функціонує кілька замаскованих автоматизованих баз ударних підводних безпілотних систем. Лідером у реалізації програм у сфері військової морської робототехніки є США. Аналіз основних тенденцій та перспективних розробок в області створення і використання сучасних морських робототехнічних комплексів в США показав, що плани розвитку націлені на стрімку інтелектуалізацію, можливість одночасно виконувати багато функцій та реалізовувати декілька різнопланових цілей (гібридність). Це, наприклад, самостійно здійснювати пошук підводних і надводних об'єктів, ідентифікувати їх, при цьому залишаючись практично непомітними для противника [199].

Концептуалізація, проектування, технологічна проробка, створення та експлуатація таких високотехнологічних пристроїв, як АПА, вимагає величезних капіталовкладень. Наприклад, бюджет США, із загальної суми бюджету Міністерства оборони на 2017 рік у 583 млрд доларів, на військову підводну робототехніку виділів близько 70 млрд доларів. У галузі

проектування і будівництва АПА існує гостра конкуренція. Наприклад, за контракти від ВМС США на будівництво АПА йде конкуренція серед таких великих компаній, як *General Dynamics*, *Boeing*, *Boston Engineering Corporation*, *Knifefish*, *Echo Ranger*, *SeaRobotics*, *BAE Systems*, *Kongsberg Maritime* та інших.

Слід зазначити, що де які АПА можуть запускатися і з борта надводного корабля, і з населеного підводного човна. Велика кількість АПА готова для прийняття на озброєння ВМС США до 2021 року.

Типовим прикладом гібридного автономного (безлюдного, ненаселеного) апарата як підводного, так і надводного класу є апарат *ACTUV* (*Anti-submarinewarfare Continuous Trail Unmanned Vessel*) «*Sea hunter*» («Морський мисливець») (рис. 1.2). Це надводний безпілотник з високою автономністю, який знаходиться у режимі патрулювання заданих акваторій.

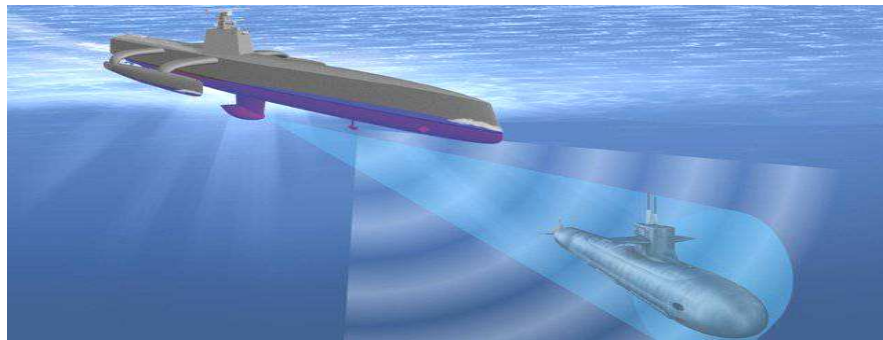


Рисунок 1.2 – Безпілотний робот-мисливець для виявлення підводних субмарин (*ACTUV*)

Його загальна вага 145 т, довжина корпусу – 40 м. Корпус судна в робочому стані майже повністю занурений під воду, а над поверхнею залишається тільки невелика частина (арка), всередині якої розташовані системи зв'язку з оператором. Судно розвиває максимальну швидкість 27 вузлів при автономності функціонування на термін до 90 діб. Навігація судна в автономному режимі реалізується через комбінацію системи різноманітних бортових датчиків і штучного інтелекту [241]. Як побудована його енергетична система, система живлення, які використані двигуни – не розкривається [199]. Основною причиною розвитку цієї програми стала загроза зростання кількості порівняно недорогих дизель-електричних

підводних субмарин, закупку яких можуть собі дозволити не тільки уряди багатьох слаборозвинених країн, але й наркокартелі та приватні особи.

Управління перспективних дослідницьких проектів Міністерства оборони США (*Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA*), що відповідає за розробку нових технологій для використання в інтересах збройних сил США, відкрило програму зі створення безпілотних морських суден і роботів-мисливців за підводними човнами, здатних знаходитися в автономному плаванні протягом декількох місяців [240]. У рамках цієї програми американською компанією *Juliet Marine Systems (JMS)* розроблений безпілотний плавальний засіб – судно «*Guardian*» (рис. 1.3), здатний функціонувати, як у пілотованому, так і у безпілотному режимах, ефективно виконувати ряд завдань цивільного і військового призначення, як на поверхні, так і при повному зануренні у воду [80, 245].

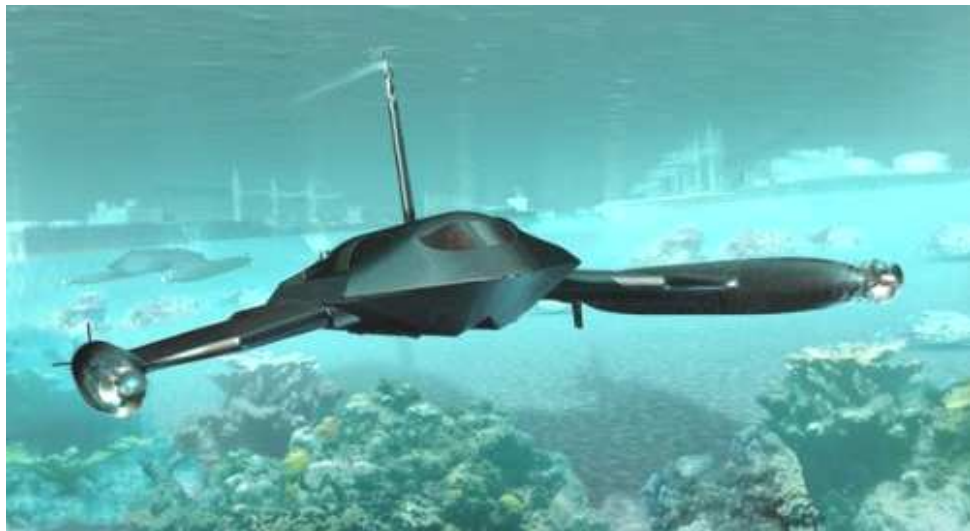


Рисунок 1.3 – Безпілотний плавальний засіб – судно «*Guardian*»

У судна «*Guardian*» для зменшення опору води під час руху використовується ефект суперкавітації, який полягає у створенні оболонки з крихітних газових бульбашок навколо зануреної у воду частини судна. Такий ефект дозволяє суттєво збільшити швидкість руху судна без додаткових витрат енергії. Судно «*Guardian*» довжиною 14 м. Перебуваючи у надводному положенні, може розвивати швидкість 35 вузлів. У дію його рушії приводить гібридна дизель-електрична силова установка і акумуляторні батареї, що

забезпечують судно енергією під час роботи в підводному положенні. Потужність, витрати палива, типи електродвигунів, принципи побудови пропульсивного комплексу (ПК) не розголошені. Слід підкреслити, що багатоцільове судно «*Guardian*» здатне корінним чином змінити тактику проведення деяких морських операцій, особливо в прибережних районах, включаючи потайливі розвідку і спостереження, висадку десанту, протидію підводним човнам противника і вогневу підтримку на малих дистанціях.

Компанія *ZPM* представила розробку проекту безпілотного морського катера «*Piranha Unmanned Surface Vessel*» (*USV*) (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Безпілотне багатоцільове судно «*Piranha*» (*USV*)

Елементи силової частини і корпус судна виготовлені з пластику *Arovex*, який армований волокном, що складається з вуглецевих нанотрубок. Завдяки подібному матеріалу, судно довжиною 16,5 м важить всього лише 3,6 т, при цьому має можливість взяти на борт 6,8 т корисного вантажу. В автономному режимі дальність дії судна становить приблизно 4 тис. км. Дані характеристики роблять безпілотний катер «*Piranha*» високоефективним транспортним засобом для проведення антипіратських місій, операцій з пошуку та рятування моряків з потерпілих аварію суден, проведення патрулювання прибережних районів, супроводу транспортних конвоїв чи одиночних суден з метою захисту їх від можливого нападу з боку морських піратів [75]. Як реалізовані системи руху і який використано принцип побудов ПК, також, не розголошується.

У ВМС США існує програма розробки модульних багатоцільових автономних ненаселених підводних апаратів (АНПА) – *MRUUV* (*Multi Mission Reconfigurable Unmanned Undersea Vehicle*) (рис. 1.5). Вони призначені для застосування з підводних субмарин і здатні забезпечувати вирішення більш широкого кола задач в інтересах судна-носія (бази), оперативних формувань флоту і вищого командування.

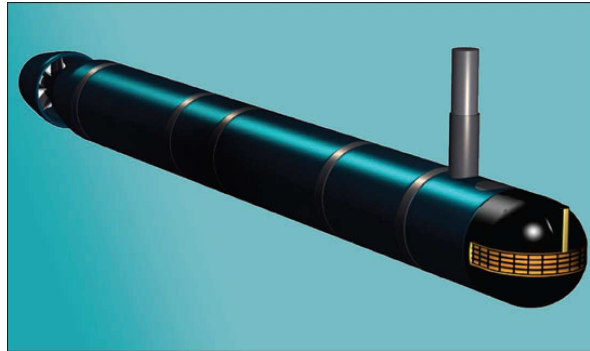


Рисунок 1.5 – Автономний апарат типу «*MRUUV*»

Ці задачі включають: ведення розвідки в прибережних районах, обстеження акваторії в заданому районі, виявлення і класифікація підводних об'єктів, картографування морського дна, виконання гідрографічних досліджень, участь в розгортанні підводних бойових телекомунікаційних і навігаційних мереж. Рішення широкого кола задач забезпечується завдяки наявності змінного корисного навантаження [199]. Відомо, що система рушіїв судна повністю електрична, але як вона побудована, які її параметри, складові елементи – закрито і не розголошується.

Компанією «*Aquabotix*» (Австралія) розроблений багатоцільовий гібридний апарат типу *AUV/ROV* – підводний транспортний засіб, що складається з автономного підводного апарата (*AUV*) і дистанційно керованого апарата (*ROV*), здатний одночасно здійснювати автоматизацію і контроль (рис. 1.6). *AUV's* працюють автономно, вони запрограмовані, можуть рухатися самостійно, виконуючи місії протягом декількох діб, змінювати глибину і маневрувати, але тільки у певних напрямках. *ROV's* залежать від операторів, які керують апаратом, використовуючи комп'ютерну консоль або на березі, або на

судні. Незважаючи на це, *ROV's* більш маневрені, ніж *AUV's*. Такий гібридний *AUV/ROV* апарат здатний змінювати спосіб проведення підводних зйомок. Для пошуку в широкому діапазоні гібрид може бути легко запрограмований на проведення сітки або лінійного пошуку в режимі *AUV*. Для більш ретельного аналізу умов оператори можуть прикріпити трос і маневрувати *ROV* для захоплення більш детальніших зображень і зчитування даних.



Рисунок 1.6 – Апарат «*Aquabotix Hybrid*» типу *AUV/ROV*

Гібриди *AUV/ROV* використовуються: а) для інспекцій мостів і дамб, для картування мостових і дамбових конструкцій в режимі *AUV*, для поглибленої інспекції у режимі *ROV*; б) у ВМС для протидії підвищеним підводним загрозам; в) для забезпечення безпеки портів, здійснення спостереження і розвідки завдяки своїм швидкості, простоті в запуску й маневреності; г) для спостереження і забезпечення безпеки океанічних і внутрішніх водних шляхів, завдяки надійності і економічності [122]. Ніякої інформації про електрорушії, систему живлення і перетворення енергії у відкритому доступі не має.

Британське надводне багатоцільове судно «*C-Worker 5*» (рис. 1.7) здатне на одному паливному баку рухатися зі швидкістю 9 км/год протягом цілого тижня.



Рисунок 1.7 – Надводне багатоцільове безпілотне судно «*C-Worker 5*»

Апарат працює на дизельному двигуні. Залучати «*C-Worker 5*» можна до виконання самих різних місій, у залежності від встановленого на судно обладнання. Це ідеальна платформа для виконання гідрографічних досліджень. Апарат може, як керуватися оператором, так і діяти самостійно. Прекрасно взаємодіє з іншими безпілотними пристроями [249], але для виконання задач подвійного призначення майже не пристосовано, легко пеленгується і досить шумне при роботі.

«*Saab AUV62-AT*» (Швеція) – високотехнологічний автономний підводний дрон (рис. 1.8), призначений для використання ВМС у якості тренувальної цілі, має, також, бойове призначення.

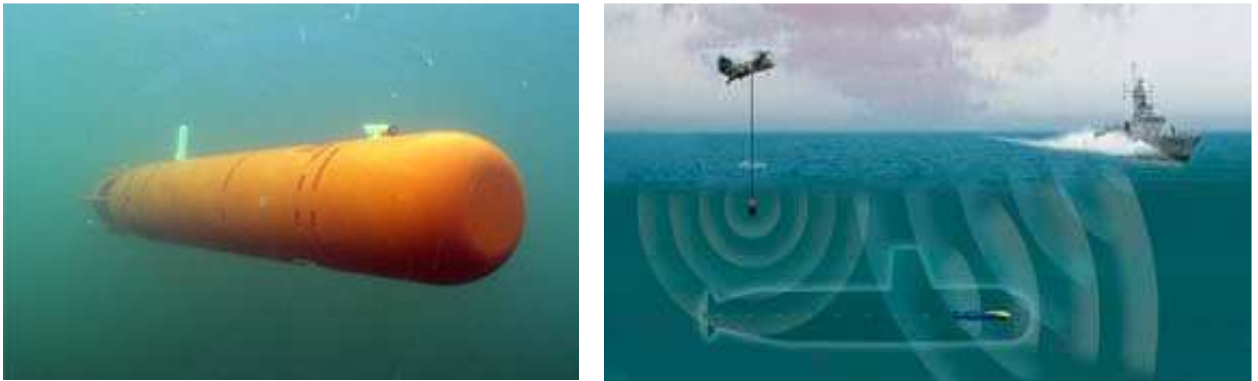


Рисунок 1.8 – Дрон «*Saab AUV62-AT*» у режимі імітації підводних човнів

«*AUV-62-AT*» імітує присутність ворожого підводного човна, дозволяє проводити тренування операторів, перевірку сонарів і систем керування протичовнових засобів, заощадивши на дорогих виходах в море традиційних навчальних цілей – справжніх підводних субмарин. Занурюється апарат на глибину до 300 метрів і може діяти в автономному режимі до 20 годин. Дрон може бути запрограмований на рух по заданому маршруту або управлятися оператором в реальному часі по радіо або акустичному каналу зв'язку. Принцип побудови енергетичної системи не розголошений [242].

Безпілотний автоматичний робот «*Iver-3*» (рис. 1.9), розроблений компанією «*Oceanserver*» (США), має вигляд невеликої торпеди. Ідеально підходить для використання в прибережних зонах, для забезпечення дослідницьких робіт, моніторингу навколишнього середовища. Може використовуватися для виявлення підводних мін. Важить безпілотне судно

36 кг і може занурюватися на глибину до 100 м, працюючи протягом 8 год. «Iver-3» – недорогий, надійний, ефективний, простий в експлуатації апарат, має функцію запуску і керування з берега. Принципи побудови систем електроруху, живлення, керування – невідомі [246].



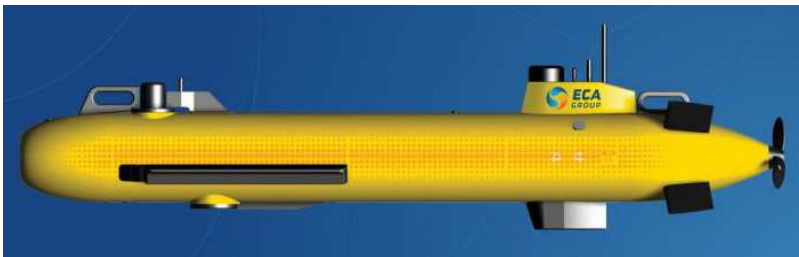
Рисунок 1.9 – Безпілотний автоматичний морський робот «Iver-3»

Багатофункціональний безпілотний літаючий апарат-амфібія підводного базування «CRACUNS» (рис. 1.10) розроблений фахівцями Університету Джона Хопкінса (США). Здатен протягом тривалого часу ховатися під водою, піднімаючись у політ у необхідний момент. «CRACUNS» може бути обладнаний як підводний човен і безпілотний підводний апарат. За командою «CRACUNS» від'єднується від бази, і спливає, регулюючи напрямку руху гвинтами. Досягнувши поверхні – злітає. За допомогою цієї нової розробки підводні човни зможуть запускати безпілотники-розвідники, залишаючись непомітними для супротивника. Висока «живучість» під водою підтвердила ще одну можливість використання «CRACUNS» – безпілотники можна таємно закидати в прибережну зону або водойми, після чого у заданий час, або по команді оператора, використовувати для виконання розвідувальних або диверсійних задач. Завдяки високій функціональності і надійності, «CRACUNS» можна використовувати в місцях, де висока ймовірність втратити безпілотник. Також апарат можна використовувати для доставки засобів першої допомоги та рятувального спорядження людям, працюючим на морі. Енергетична система, рушії, системи перетворення і розподілу енергії не розголошуються [243].

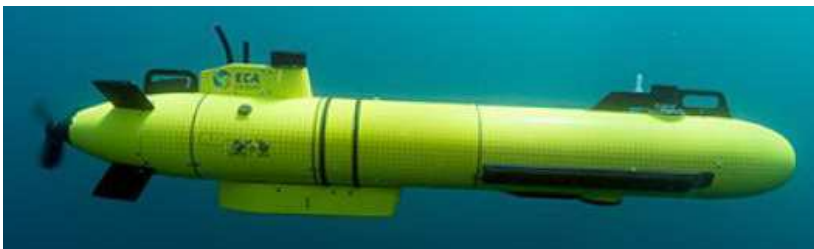


Рисунок 1.10 – Багатофункціональний безпілотний літаючий апарат-амфібія підводного базування «CRACUNS»

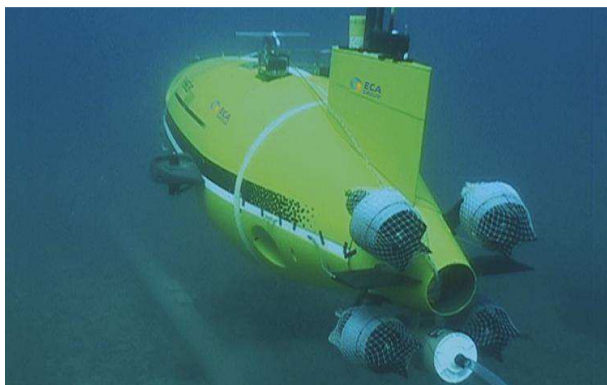
ECA Group (Франція) виробляє модульні конструкції АПА спеціального призначення серій A9, A18, A27, *AliStar 3000* й інші, основною відмінністю яких є модульність конструкцій. Дедвейт таких апаратів змінюється нарощуванням модульним корпусом, що дозволяє встановлювати різне додаткове обладнання, датчики, корисне навантаження.



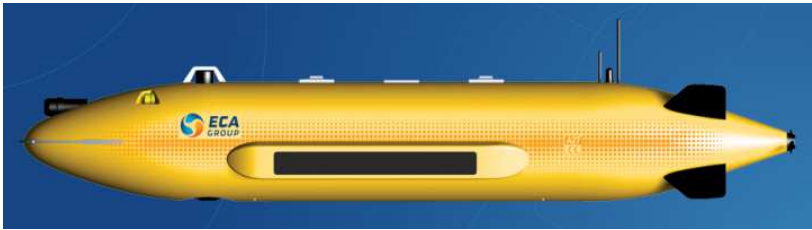
а) *ECA Group*, AUV типу A9



б) *ECA Group*, AUV типу A9x



в) *ECA Group*, AUV типу *AliStar3000*



з) *ECA Group, AUV*
типу *A27*



д) *ECA Group, AUV*
типу *A27x*

Рисунок 1.11 – Автономні плавальні апарати масою до 800 кг виробництва Франції (*ECA Group*)

A9, A9x – автономні компактні підводні апарати. Використовуються за допомогою засобів ручного запуску, може використовуватися на мілинах. Призначення – протимінні міри (пошук, класифікація), обстеження морського дна, гідрографія і океанографія, внутрішня безпека (визначення розташування затонулих суден, безпека у портах і прибережних районах). Має можливості оснащення різним навантаженням, різними акумуляторами. Відрізняються засобами зв'язку, системами стабілізації.

AliStar 3000 – рішення для складних операцій з глибоководних зйомок та інспекцій. Автономний підводний транспортний засіб типу *AUV*, є модульною системою, здатною виконувати безліч завдань і оснащений точними датчиками різного призначення. Легко розгортається та експлуатується з різних кораблів.

A27, A27x мають діаметри 700 мм і 580 мм та час автономної роботи до 50 годин. Це гнучка платформа, здатна легко перебудовуватися і одночасно працювати з великим діапазоном різних датчиків і пристроїв моніторингу. Здатні виконувати місії в таких сферах, як вимірювання різного типу (швидкість, хвилювання, кліматичні параметри тощо), як обстеження морського дна, локалізація корабельних аварій і катастроф підводних суден, збирання гідрографічних даних, акустика, спостереження.

Особливостей побудови електроенергетичної системи, використаних типів маршових двигунів, систем стабілізації виробник не наводить.

Військова доктрина Китаю включає будівництво цілого флоту активно взаємодіючих, один з одним і з військовими кораблями, автономних БМА різних типів. Зокрема, зусилля підводних дронів (*UUV*) і надводних роботів (*USV*) стануть одним з ключових елементів протичовнової оборони. Крім рухливих роботів, «Велика Підводна Стіна» буде укомплектована численними підводними сенсорами – приблизно такими, які використовували США для виявлення радянських підводних човнів. Втім, система має і мирне застосування – за її допомогою можна реєструвати цунамі і отримувати дані природного моніторингу.

1.2. Визначення поняття «ефективна експлуатація» багатоцільового морського судна

Загальноприйнятий термін «Експлуатація, це стадія життєвого циклу (ЖЦ) обладнання, на якій реалізується його призначення, підтримується і відновлюється його якість. Комерційно доцільна експлуатація морського транспортного засобу досягається лише у певному організаційно-технічному середовищі, яка є конгломератом технічних засобів та об'єктів експлуатації, організаційних структур і ресурсів. Експлуатація, у тому числі морських суден, включає у себе використання за призначенням, транспортування, зберігання, технічне обслуговування та ремонт» (ГОСТ 25866-83). Зрозуміло, що: *а)* головне завдання будь-якої системи виробництва, це отримання максимального і стабільного прибутку; *б)* досконалість системи виробництва залежить від попередньо прийнятої концепції її побудови, тобто прийнятих аван-проектних рішень. Ясно, що вирішення завдання отримання стабільного і максимально можливого прибутку (ефективність комерційної експлуатації окремого судна чи флоту) залежить від досконалості та принципів організації системи виробництва, досконалості її структури, ефективності використаних систем експлуатації, технічного обслуговування і ремонту окремих суден і їх технічних систем.

Для оптимізації процесів синтезу окремих нових систем суден, подальшої їх експлуатації та ремонту, необхідно використання спеціальних методик, використання технічних, економічних та/чи інтегральних критеріїв якості. Всі показники і критерії якості повинні дозволяти оцінювати досконалість систем, об'єктів, процесів, у тому числі – експлуатаційних. Наприклад, застосування універсальної загальноприйнятої оцінки – коефіцієнту корисної дії (ККД) для АПА, показує, яка частина витрат перетворена у цільовий ефект, тобто у дальність дії апарата.

У роботі [192] показано, що основна мета $C_{Ц}$ експлуатації торговельного судна цивільного призначення – комерційна:

$$C_{Ц} = C_{P_e} \cdot P_E - (C_Y \cdot E_Y + C_T \cdot E_T + C_P \cdot E_P + C_V \cdot \Delta V),$$

де C_{P_e} , C_Y , C_T , C_P , C_V – вартісні показники транспортної роботи, потоків енергії, технічного потенціалу; $C_{P_e} \cdot P_E$ – доходи від транспортної роботи; $C_Y \cdot E_Y$ – витрати на керування і особовий склад; $C_T \cdot E_T$ – витрати на паливе і допоміжні матеріали; $C_P \cdot E_P$ – витрати на ремонт; $C_V \cdot \Delta V$ – витрати на відновлення технічного потенціалу. Авторами пропонується цільова функція:

$$F_{Ц} = \Sigma (D_{чи} \times T_{ei}) / \Sigma (R_i \times n_i),$$

де $D_{чи}$ – чиста вантажопідйомність судна, т; T_{ei} – експлуатаційний період, доби; R_i – сумарні витрати на технічну експлуатацію (ТЕ), грн; n_i – кількість членів екіпажів суден, експлуатаційних працівників, середня кількість працівників судноремонтних заводів.

Ясно, що остання складова для АПА суттєво зменшується і, саме за рахунок її, можливе отримання значимого комерційного ефекту. Для досягнення максимального значення $F_{Ц}$ необхідне збільшення T_{ei} при зменшенні R_i . Наприклад, у зв'язку із старінням суден потребу у ремонті можна знизити шляхом забезпечення ефективної технічної експлуатації, підтримання на високому рівні функцій всіх систем судна, підвищенням ефективності роботи баз технічного обслуговування і ремонту.

Для морських транспортних систем використовується термін «ефективність», де розуміється «інтегральна властивість цілеспрямованого процесу функціонування агрегату, системи, пристрою, механізму,

устаткування і так далі, що характеризує ступінь його пристосованості до виконання головної мети з урахуванням витрат ресурсів (матеріальних, часових)». У роботах [197, 208] показано, що для судна цивільного призначення необхідне врахування наступного.

1. Прийняти, що термін «ефективність» відноситься до цілеспрямованого процесу використання судна, як виробничої системи, а процес ефективної експлуатації є синергетичним об'єднанням загальної концепції синтезу конструкції, єдиної мети застосування, узгодженістю і цілеспрямованістю сукупності дій на усьому життєвому циклі судна. Тобто, якщо оцінювати ефективність експлуатації АПА, то необхідно сформулювати головну мету, яку необхідно досягти. Саме така мета для суден багатоцільового призначення дуже погано може бути формалізована, що є одним з наукових протиріч, яке необхідно вирішувати.

2. Визначати ефективність використання і результуючу ефективність цілеспрямованої діяльності сучасного морського судна не тільки досконалістю обладнання, умовами функціонування і експлуатації, раціональністю використання ресурсів, не тільки якою ціною і за який часовий інтервал буде досягнута мета, не тільки якою ціною (у інтегральному сенсі) буде отриманий цільовий ефект і яка витрата ресурсів зумовить здійснення процесу, але і якістю прийнятих концептуальних рішень, зокрема – архітектурною композицією судна і його систем, закладених перспективних можливостей використання, організації якісного обслуговування тощо.

Відома «загальна ефективність обладнання» (*Overall Equipment Effectiveness – OEE*) [248], яка враховує готовність обладнання та втрати від простою, продуктивність обладнання, втрати від зниження швидкості виробництва, якість продукції, втрати від зниження якості. При оцінках за допомогою *OEE*, враховується ціна досягнення мети, тому необхідно додаткове порівняння вартості можливих заходів і вигоди від їх реалізації. Тобто, з практичної точки зору, визначення ефективності експлуатації морського транспортного засобу має цінність тільки при комплексному проведенні оцінок, аналізі та синтезі. Синтез ефективного процесу експлуатації полягає у відборі значень керованих параметрів, які гарантовано забезпечують необхідний

інтегральний показника ефективності. Слід підкреслити, що тільки при системному підході до оцінки ефективності експлуатації судна можливі якісні обґрунтування необхідності процесів проектування і створення нового судна, його систем і складових елементів, обґрунтування вибору способу застосування судна для досягнення сформульованої мети.

За визначенням [38], «допоміжний флот – складова частина ВМФ, яка організаційно складається із з'єднань і частин морських і рейдових суден забезпечення, суден спеціального призначення. Допоміжний флот призначений для забезпечення бойової і повсякденної діяльності кораблів і берегових частин ВМФ». Судна забезпечення входять до складу ВМФ – військове або рейдове судно, призначенням якого є забезпечення діяльності сил флоту у воєнний і мирний час. Тобто такі судна можуть бути, як спеціальної конструкції, так і переобладнаними з інших кораблів/суден. Наприклад, судна забезпечення базування кораблів і обладнання театрів бойових дій призначені для забезпечення зв'язком та постачання маневрених пунктів базування, проводки кораблів і суден у льодах, прокладки підводних кабелів, трас, конвоювання, супроводу, моніторингу, навігації і виконання безлічі інших завдань. Основним завданням дослідження є розробка теоретичних передумов для створення у перспективі високоефективних при *багатоцільовій* експлуатації на внутрішніх водах України автономних морських суден. Зрозуміло, що тільки багатоцільові судна забезпечують вирішення специфічних завдань, як цивільного, так і військового флотів України. Відзначимо, що ефективна комерційна експлуатація судна і ефективна бойова експлуатація розрізняються.

Так, бойова ефективність (БЕ) АПА – узагальнююча характеристика озброєння і військової техніки (ОВТ). За її допомогою оцінюють ступінь відповідності АПА функціональним призначенням і цілям, поставленим при створенні конструкції. Загальна оцінка АПА, як системи ОВТ проводиться за допомогою критеріїв, а їх використання забезпечить: а) відповідність економічним обмеженням, б) мінімізацію і раціональне використання ресурсів, в) високий рівень ефективності, узгодження можливостей АПА, як системи ОВТ зі стратегічними цілями розвитку Збройних сил України (ЗСУ).

Теоретично, АПА необхідно використовувати тільки так, щоб у межах свого життєвого циклу АПА задовільняв критерію «Ефективність – Час – Вартість». Тобто внесок при використанні АПА у збитках, що наносяться противнику, повинен бути виправданий тактично і економічно. Це основний визначений принцип ефективної експлуатації багатоцільових АПА, саме у цьому полягає головна концепція і домінанта дій ЗСУ в умовах захисту морських акваторій України, її прибережних територій. Це також є складовою протиріччя у теоретичному обґрунтуванні конструкції та ефективної експлуатації електрорушіїв багатоцільових АПА при застосуванні його як багатоцільового судна допоміжного флоту.

При обґрунтуванні конструкції та призначення всіх систем багатоцільового АПА в умовах обмежень фінансів, часу, технологій, нормативно-правових та соціально-політичних чинників, необхідний прогноз його внеску у наявний потенціал флотів, у ціну реалізації проекту, у ключові потенційні характеристики тощо.

Аналіз властивостей нових і перспективних АПА, як ОВТ використовує показники ефективності, вартості і можливостей експлуатації. При цьому для визначення значень цих показників необхідне моделювання бойового застосування АПА у типових ситуаціях. В умовах безперервного вдосконалення противником систем навігації, розвідки, протиповітряної оборони, зв'язку, радіоелектронних та кіберзасобів, логістики, керування та інших систем озброєння багатоцільового призначення, затримка з прийняттям на озброєння ВМС України нових, ефективних і недорогих у виробництві АПА, як елементів сучасного флоту, приводить зниженню бойової ефективності інших нових систем. Фахівцями Військової академії (м. Одеса) та інституту ВМС Національного університету «Одеська морська академія» визначені показники оцінки бойової ефективності багатоцільових суден: *а)* ймовірність виконання бойового завдання; *б)* ймовірність ураження типової цілі; *в)* математичне очікування виконання завдання та доведено, що ці показники ефективності, повинні бути сформульовані вже на етапі аван-

проекту створення багатоцільового АПА і є основою для проектування його окремих технічних систем і засобів.

Слід відзначити, що дуже важливим є такий чинник, як можливість універсального використання АПА. Відомо, що багатоцільове судно це таке судно, яке пристосоване для здійснення низки технологічних функцій, які виконуються декількома вузькоспеціалізованими суднами. Багатоцільові морські транспортні засоби будують з метою універсалізації застосування у різних експлуатаційних умовах і обставинах – для більшої гнучкості і економічності, для вирішення різноманітних і нестандартних завдань, в умовах нестачі часу на проведення спецоперацій та інших обставинах, що не дозволяють застосування вузькоспеціалізованих суден. Під загальним поняттям *«товар багатоцільового призначення (застосування)»* визначають продукцію, вироби, обладнання або технології, які можуть задовольняти і цивільні потреби, і використовуватися задля військових цілей.

Є відмінності у концептуальному підході до визначення принципів конструювання багатоцільових АПА і їх окремих систем і прийнятих при проектуванні цивільних суден. Саме ці відмінності у концепції проектування (урахування модульності конструкції, можливості швидкої заміни обладнання, можливості «одноразового» застосування, універсальність), дозволяють їх ефективно застосовувати у мирний і у воєнний час.

«Наразі потрібна висока гнучкість виконання бойових і антитерористичних завдань, вкрай гострою стає роль інформаційних технологій, розвідки, обробки інформації, пошуку, порятунку і т. д. З огляду на обмеженість матеріальних ресурсів, морські держави вимушені не тільки встигати за науково-технічним прогресом, а вирішувати завдання довгострокового «упередженого» планування, оптимізувати склад флоту, визначати, які судна знадобляться у найближчій перспективі, і, що головне, як поєднувати функції суден для виконання мирних і бойових завдань» [188, 227, 236].

Визначені світові тренди розвитку флотів доводять, що найбільші морські держави віддають перевагу малим універсальним суднам і кораблям різного функціонального призначення і з різними ТТХ. Зокрема – це невеликі

багатоцільові АПА, наприклад, такі, які можуть нести бойовий елемент озброєння, моніторинговий літаючий безпілотний апарат, легкий безпілотний бойовий гелікоптер, інші безпілотні літаючі і морські апарати, різні спеціалізовані та допоміжні засоби розвідки і системи, які можуть здійснювати льодову проводку, виконувати завдання постачання, навігації, розвідки тощо. Така концепція побудови багатоцільових АПА відповідає концепції НАТО «Максимум боєздатності у перерахунку на один долар». За такою концепцією створено безліч кораблів ВМФ США, Франції, Норвегії. Наприклад, це АПА берегової охорони, кораблі патрулювання, оперативного реагування, демонстрація сили; автономні підводні човни, недорогі у будівництві та які здатні протидіяти різним кораблям, суднам, літакам і гелікоптерам; автономні сторожові кораблі, які здатні виконувати різні завдання у складі флоту або поодиночі. Загалом це все судна, які здатні перевозити спорядження, боєприпаси, медикаменти, продовольство та надавати бойову підтримку.

Сучасний ВМФ України поступово перетворюється на флот, який у своїй більшості складений із недорогих багатоцільових кораблів, обладнаних новітньою електронікою й озброєнням, та які дозволяють проводити свою подальшу модернізацію і удосконалення. Такі невеликі багатофункціональні кораблі здатні не тільки, наприклад, брати участь у різних антитерористичних операціях, а й надавати гуманітарну допомогу, ефективно захищати території, наприклад, портів.

Зараз ареною битв є узбережжя. Саме тому ролі різних класів бойових кораблів різко змінилися і дуже часто універсальність корабля, здатність його вирішувати різноманітні та непередбачувані завдання подвійного призначення має суттєве економічне і політичне значення.

Узагальнив наведений огляд можливих існуючих конструкцій багатоцільових АПА, можна запропонувати спрощені конструктивні рішення, які здатні використатися у сучасних багатофункціональних морських безпілотних транспортних засобах (рис. 1.12 і рис. 1.13) України.

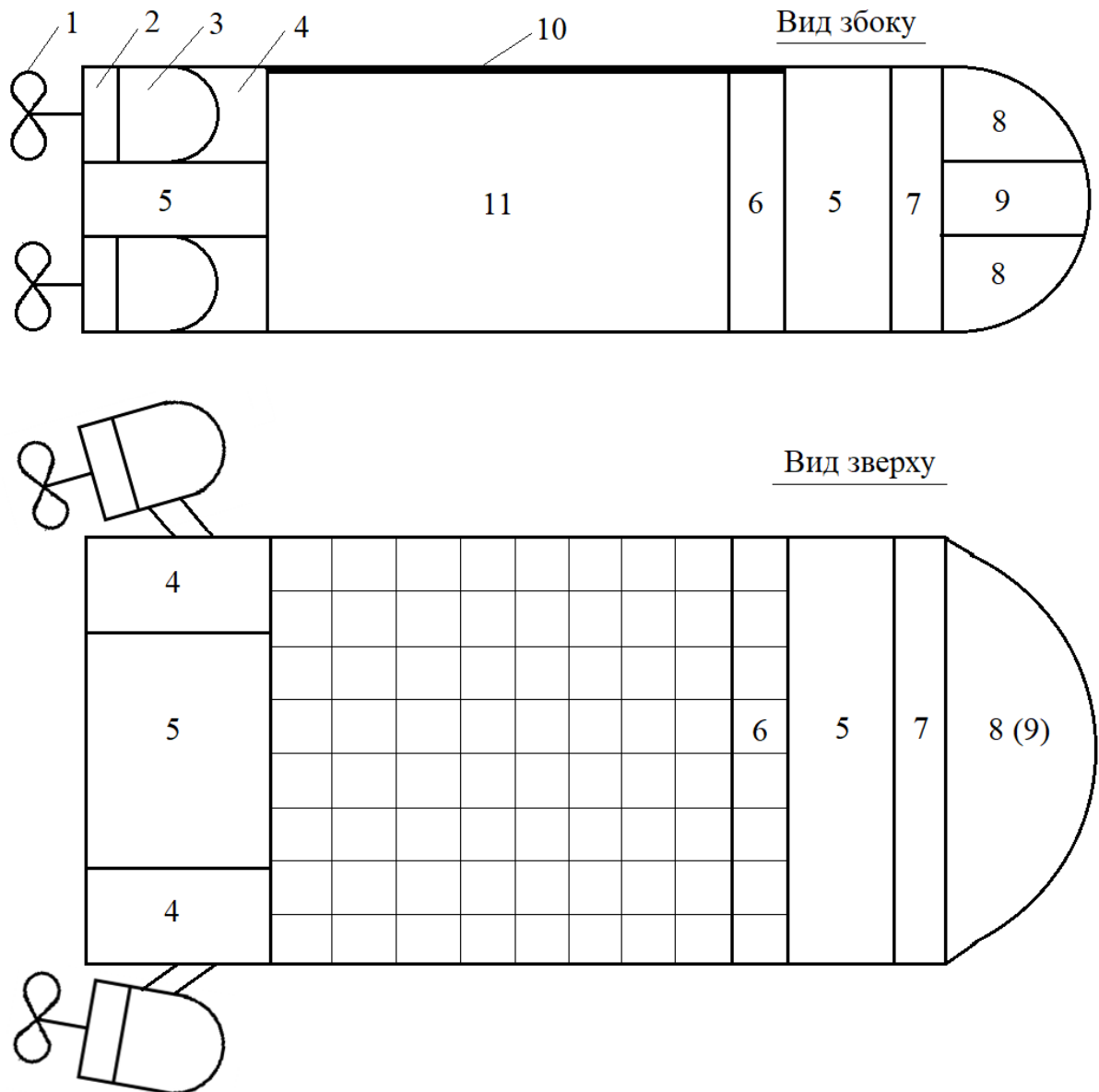


Рисунок 1.12 – Типова конструкція перспективного зразка багатоцільового

АПА (тип А):

- 1 – гребний гвинт; 2 – редуктор; 3 – баророзвантажений двигун;
- 4 – перетворювач напруги (електроприводи, перетворювачі енергії);
- 5 – акумулятор, система живлення; 6 – система керування (бортовий комп'ютер, МП-система); 7 – навігаційні датчики; 8 – локатори бокового огляду;
- 9 – додаткове обладнання (ліхтарі, камери, сонари та ін.);
- 10 – сонячна батарея, як опція; 11 – допоміжне обладнання («корисне навантаження»: додатковий акумулятор, вантаж, маніпулятори тощо)

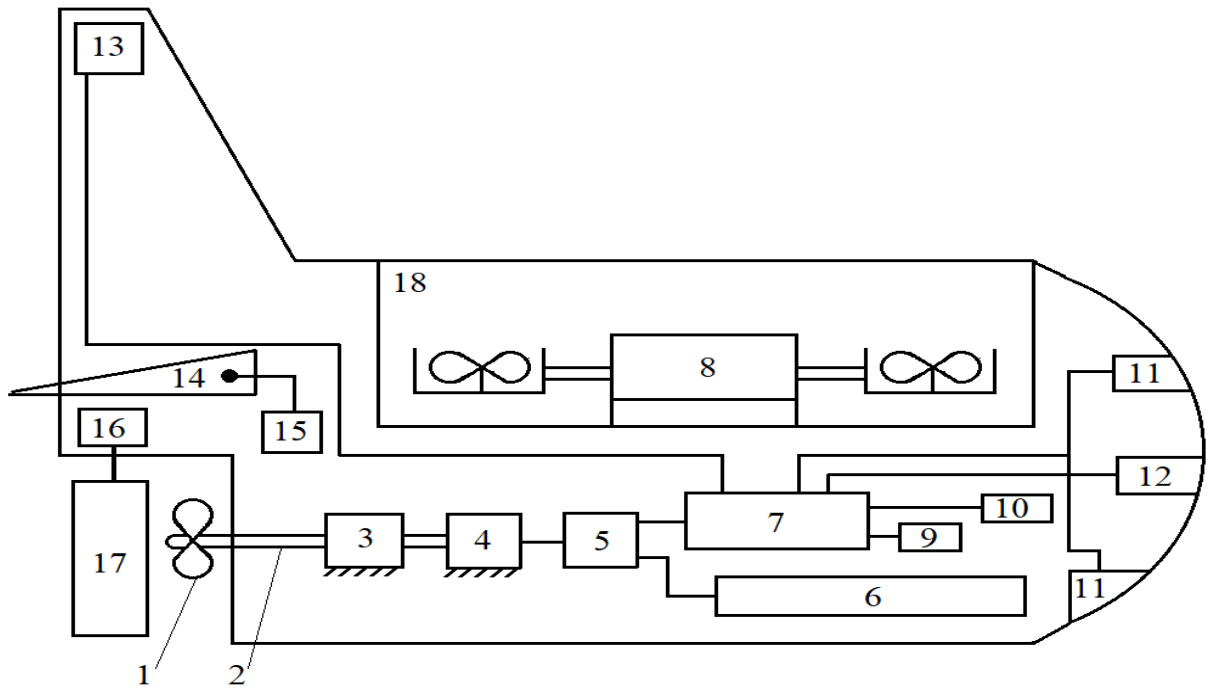


Рисунок 1.13 – Типова конструкція перспективного зразка багатоцільового АПА (тип В):

- 1 – гребний гвинт; 2 – валопровід; 3 – редуктор; 4 – електродвигун;
 5 – перетворювач енергії; 6 – акумулятор; 7 – система керування (бортовий комп'ютер, МП-система); 8 – бойовий/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 – стернова машина вертикального стерна;
 16 – стернова машина горизонтального стерна;
 17 – горизонтальне стерно; 18 – вантажний відсік

Виходячи з проведеного аналізу сучасного стану морських безпілотних суден, можна відмітити їх постійно зростаючу значущість. Саме це призвело до стрімкого створення і розповсюдження принципово нового класу аналогічних пристроїв, а саме багатоцільових АПА, які можуть одночасно виконувати декілька функцій притаманних транспортним засобам як цивільного, так і військового призначення.

1.3 Критичний аналіз сучасних і перспективних автоматизованих систем керування для багатоцільових АПА

Основною задачею при розробці АСК для багатоцільового АПА є застосування такого схемотехнічного рішення, яке дозволить реалізовувати всі поставлені технологічні задачі з необхідними критеріями якості процесів керування.

У технічній літературі Великої Британії та США описані АПА, для керування якими використовують принципи штучного інтелекту [170]. Підвищення вимог до точності та ефективності керування електрорушійними багатоцільових АПА стимулює побудову АСК шляхом застосування адаптивних ПІД-регуляторів і нечіткої логіки. Суттєвий вклад у розробку нечітких регуляторів і систем на їх основі для приводів загальнопромислового та спеціального призначення внесли українські та зарубіжні вчені В. І. Архангельський, В. С. Блінцов, В. І. Гостєв, Ю. П. Зайченко, О. В. Збруцький, В. М. Казак, В. Б. Клепиков, А. О. Лозинський, В. А. Терехов, А. U. Levin, T. Miller, A. A. Yamamura та інші [74, 165, 194]. Проте питання розробки таких регуляторів для АСК електрорушійними багатоцільових АПА на сьогодні в науково-технічній літературі розглянуто недостатньо.

Так, у роботі [53] розглянуті алгоритми адаптивного керування АПА. Для оцінки стану пропонується спостерігач режиму ковзання високого порядку. Але ж енергетичне забезпечення режимів АПА у [53, 84, 94] не враховане. При цьому пропонується технічно складне рішення спостерігача.

Сьогодні дослідження і синтез різноманітних систем для АПА вкрай популярні та інтенсивно розвиваються. Відомо [79], що майбутнє автономних транспортних засобів із зануренням (АТЗЗ) слідує різноманітним напрямкам розвитку, включаючи гібридні засоби, а також вузькоспеціалізовані транспортні засоби для доступу до складних середовищ і досягнення спеціалізованих наукових цілей. У роботах [79, 112] визначено тенденції та перспективні напрямки досліджень у галузі створення АТЗЗ, виділені методи стабілізації

курсу з використанням різних сенсорних технологій, описані відповідні АСК. У всіх наукових працях, проспектах й інших інформаційних джерелах показана необхідність вирішення задач удосконалення всіх елементів АПА (енергетичної системи, систем навігації, перетворення енергії тощо), але конкретика (яким чином, якими пристроями, з якими характеристиками, принципами побудови) не наводиться і є предметом комерційної чи військової таємниці. Також не розглянута чи не розголошена принципова можливість застосування подібних АТЗЗ у багатоцільовому призначенні.

Технічне рішення для гібридної установки підводного робототехнічного транспортного засобу та його АСК приведено у роботі [84]. З метою оцінювання енергоспоживання проведено порівняння різних типів приводних механізмів, як у вертикальному, так і у горизонтальному напрямках руху, запропоноване використання «одноразових» АПА.

У працях [60, 64, 94, 127] визнана важливість розробки стратегій керування та проектування гібридних морських систем і АПА, пропонується використання накопичувачів енергії на основі суперконденсаторів. Але проблеми стабілізації вихідної напруги у таких джерел та способи технічної реалізації систем електроруху не наведені.

Попередні спроби [45] розробок АПА та їх АСК були зосереджені, головним чином, на функціональних конструкціях, тоді як дуже мало досліджень спрямовано на визначення оптимальних за визначеними критеріями конструкцій. Підкреслена важливість гнучкості запропонованих теоретичних рішень, здатності визначати оптимальні попередні конструкції АПА з різними наборами вимог користувачів. Тобто у [45] наголошується актуальність досліджень і необхідність побудови конструкцій багатофункціонального призначення.

Важливість забезпечення енергоефективного функціонування АСК енергетичною системою АПА, важливість моделювання процесів руху у АПА, як складному технічному комплексі розглядається у роботі [108]. Мета моделювання – визначення зміни маси, швидкості, ефективності та

навантаження, які впливають на загальну продуктивність апарата. Але застосовані у цій роботі принципи моделювання викладені фрагментарно, що пояснюється закритими дослідженнями у цій тематиці і не можуть бути застосованими іншими дослідниками.

У роботі [128] наведена система нелінійних диференціальних рівнянь руху підводного плавального апарата у інерціальній системі координат. Показані можливості створення ефективних моделей руху АПА. Пропонована система дуже складна і має велику кількість коефіцієнтів, які проблематично, навіть попередньо, визначити.

Основні проблеми технології конструювання морського безпілотного комплексу (МБК) та функціонування його систем керування запропоновано у роботі [52]. Цей МБК складається з безпілотного поверхневого судна та групи автономних підводних транспортних засобів і утворює новий тип морської робототехніки. Енергетиці і системам керування приділено недостатньо уваги, пропонуються лише загальні рішення концептуального характеру.

Аналіз існуючих АСК сучасних АПА показує, що сьогодні відбувається швидкий та закономірний їх розвиток – від простих АСК до складних, з штучним інтелектом. Відомо, що АСК більшості прив'язних безпілотних підводних апаратів (БПА) керують їх напрямом руху за рахунок регулювання швидкості обертання маршових двигунів-рушіїв, або інших засобів активного створення керуючих сил і моментів [65, 67, 69, 140]. Розповсюдженою формою передачі команд прив'язних ПА є многоканальні джойстики (оскільки швидкість руху апарата не перевищує 1,5 м/с). Самі ж рухи є почергово лінійні, тому вони забезпечують безвідмовний розв'язок покладених на них задач керування. Існують, також, модифікації цих систем для напівзанурених плавальних апаратів [143, 156, 157]. Плавальний апарат у цьому випадку керується, як за допомогою цифрового каналу, так і автономно – за наперед встановленими програмами. Їх наведення здійснюється за сигналом, що передається по радіоканалу. Наступний етап – одночасне залучення короткохвильових каналів та супутникового зв'язку, дистанційне керування і використання штучного інтелекту.

Виходячи зі світового тренду розвитку автономних безпілотних систем в морській галузі та різноманіття функції і задач, які можна вирішувати із застосуванням роботів та роботизованих морських систем, а також забезпечення безпеки мореплавства під час комерційної експлуатації *Smart Ship* або автономних суден (у найближчому майбутньому), набуває гострої необхідності розробка методів, що враховує багатокритеріальність під час вибору пропульсивних установок для даних об'єктів багатоцільового водного транспорту, що і визначає актуальність цього дослідження.

1.4 Науково-технічні проблеми розвитку систем керування та задачі автоматизації багатоцільових автономних плавальних апаратів

Сучасні АПА відносяться до чисельного класу динамічних систем, що функціонують в умовах значних впливів зовнішнього середовища [140] і здатні ефективно вирішувати важливі задачі різного призначення, обсяг яких постійно розширюється. У зв'язку з цим спостерігається постійне підвищення вимог щодо маневреності автономних засобів водного транспорту, їх функціональних можливостей, продуктивності виконуваних робіт, що передбачає удосконалення автоматизованих систем керування рухом різних об'єктів морської робототехніки. Нові системи повинні забезпечувати точну стабілізацію заданого руху, динамічне позиціонування і орієнтацію в географічній точці водного простору тощо.

Розробка автоматизованих систем керування АПА та методів їх моделювання завжди знаходилися в центрі уваги провідних учених [140, 148]. Але, незважаючи на суттєві досягнення у цьому напрямку, однією з актуальних задач, пов'язаних з загальним синтезом конструкції, проектуванням окремих елементів та експлуатацією подібних об'єктів морської робототехніки, залишається невирішеною проблема створення високоякісних систем керування, які повинні забезпечувати бажану динаміку і точність відпрацювання програмних траєкторій руху [18] незалежно від зовнішніх збурень.

Удосконалення АСК рухом АПА відбувалося поетапно: від працюючих за «жорсткою програмою» до повністю автономних – інтелектуальних, які нині є найбільш перспективними для подальшого розвитку. Існуючі методи синтезу нелінійних, самоналагоджувальних і адаптивних систем [10] через високу розмірність і багатозв'язність об'єкта керування потребують дорогі і недоступні на вільному ринку керуючі мікропроцесорні системи, що побудовані на основі цифрових сигнальних процесорів, відповідного програмного забезпечення (ПЗ), і які вимагають безперервної ідентифікації параметрів об'єкта керування та складного самоналагодження регуляторів [9].

Необхідність підвищення безпеки мореплавання і експлуатаційних показників морських суден привели до створення різних типів альтернативних і локальних рішень, наприклад, автокермових. Сучасні автокермові забезпечують не лише ефективну стабілізацію курсу судна, але і самонастроювання параметрів системи керування курсом при змінах стану судна (опади, виду вантажу, хвилювання, стану корпусу) і умов плавання (швидкості, погоди, глибини). В результаті здійснюється стабілізація руху судна на заданому курсі при мінімальних втратах потужності суднової енергетичної установки (СЕУ) на керування (втрати нищпорення). Такі системи автоматичного керування курсом (САКК) дозволяють скоротити втрати ходового часу, збільшити провізну спроможність судна і знизити витрату палива за рейс [28], і що саме, головне, легко будувати на їх основі автономні безпілотні морські транспортні системи.

Система керування курсом сучасного морського судна повинна відповідати міжнародним вимогам (*IMO Res. A.342 (IX)*, *IMO Res. MSC. 64 (67) Annex 3*, *IMO Res. A.694 (17)*, *IMO Res. A.822 (19)* і *ISO11674 (2006) / 16329 (2003) for High Speed Crafts*, *IEC 62065 Track Control System*). Щодо використання математичних моделей динаміки судна, то Міжнародна морська організація (*IMO*) розробила і прийняла резолюцію *A.751 (18)*, яка регламентує необхідність використання даних моделей при вирішенні практичних задач мореплавання і які лежать у області безпеки судноводіння

[234, 235]. У результаті застосування резолюції А.751 (18) морськими класифікаційними органами рекомендовані для практичного використання у системах автокермування спрощені математичні моделі судна – моделі Номото першого і другого порядку [28, 212, 235]. Але на сьогоднішній день актуальною залишається задача удосконалення алгоритмів роботи автокермового [14, 26] для суден, які працюють у непередбачуваних і складних експлуатаційних умовах, при дії різних збурень. Отже, основними невирішеними проблемами при розробці АСК багатоцільових АПА і їх елементів є: а) застосування таких схемотехнічних рішень, які дозволять реалізовувати всі можливі задачі, запропоновані для виконання АПА з забезпеченням необхідних критеріїв якості процесів керування [4, 8, 140], б) здійснення пошуку шляхів економії енергії та розвиток енергозберігаючих технологій [1, 5], в) суттєвого зменшення вартості проектування, створення і обслуговування.

Основою сучасних багатоцільових АПА є його пропульсивний комплекс, який створюється на основі систем електроруку з різними типами гребних електродвигунів [23]. Тривалість автономного плавання, основні економічні, тактико-технічні характеристики (ТТХ) АПА багато в чому визначаються ефективністю цього пропульсивного комплексу, зокрема – його масогабаритними показниками і ККД.

Для будь-якого безпілотного плавального апарата час його автономної роботи є вкрай важливою характеристикою, за допомогою якої визначаються багато його технологічних функцій і можливостей. Саме тому розробка енергоефективних (енергозберігаючих) [153] систем електроруку безпілотних АПА є важливою і актуальною науково-технічною проблемою.

Відомо, що до систем керування електроруком багатоцільових АПА висуваються вимоги щодо підвищення точності дії за рахунок використання засобів автоматизації. З підвищенням швидкості руху, маневрених характеристик, вимог до точності керування й продуктивності виконуваних робіт, актуальності набуває проблема удосконалення таких систем, вирішувана шляхом синтезу нових алгоритмів керування [12].

Аналіз показує, що гвинто-стернова система електроруху багатоцільового АПА може бути побудована на основі трифазних асинхронних двигунів (АД), розрахованих на підвищену частоту живлення, вентильно-реактивних електродвигунів (*SRM*), двигунів бііндукторного типу з безобмотковим ротором, класичних двигунів постійного струму, вентильних безконтактних електродвигунів із застосуванням висококоерцетивних магнітів (*BLDC*) і інших [11, 19, 25].

За даними економічно розвинених країн, від 80 до 90 % від загальної кількості споживаної електроприводами (ЕП) електроенергії припадає на електроприводи з асинхронними двигунами (АД), причому переважно з короткозамкненим ротором. Це обумовлено їх відносно невисокою вартістю, суттєво меншою, у порівнянні з електричними двигунами інших типів, потребою у дефіцитних матеріалах, економічністю, простотою і надійністю в експлуатації. Стосовно до асинхронних двигунів широко використовуються два класи ЕП, це електроприводи з тиристорними перетворювачами напруги (ТПН) і перетворювачами частоти (ПЧ) різного типу. Відомі переваги і недоліки обох систем ЕП. Використання ЕП тієї чи іншої структури у морських транспортних засобах диктується ТТХ і техніко-економічними вимогами конкретних механізмів до електроприводу та задачами, виконуваними цими суднами.

Незважаючи на те, що історія розвитку електроприводів ТПН-АД налічує понад п'ятдесят років, не можна говорити про те, що всі наукові проблеми вирішені і резерви технічного вдосконалення таких систем вичерпані. Так, дуже перспективною є вирішення задачі практичної розробки систем і алгоритмів енергоефективного керування ЕП за системою ТПН-АД. Актуальна також розробка електромеханічних систем, спрямованих на компенсацію негативних властивостей, пов'язаних з погіршенням показників якості систем енергопостачання, у тому числі у автономних застосуваннях [2, 3, 15] на морському транспорті.

Часто і у існуючих АПА, і у розроблюваних перспективних зразках, багатоцільових АПА, використовують у якості гребних електродвигунів

асинхронні трифазні електродвигуни, як баророзвантаженого типу (рис. 1.14, авторська розробка) [24, 166], так і загальнопромислового призначення [25].

Безумовно, що сучасні системи електроруху АПА, побудовані на основі трифазних асинхронних електродвигунів з регуляторами напруги та/або частоти, повинні проектуватися з використанням комп'ютерних технологій. Існуючий рівень розвитку комп'ютерних технологій дозволяє створювати високоефективні моделі об'єктів керування будь-якої складності, у тому числі і електромеханічних, з урахуванням різноманітних зв'язків між окремими компонентами, особливостей конструкції і необхідних алгоритмів керування [7, 21, 22].

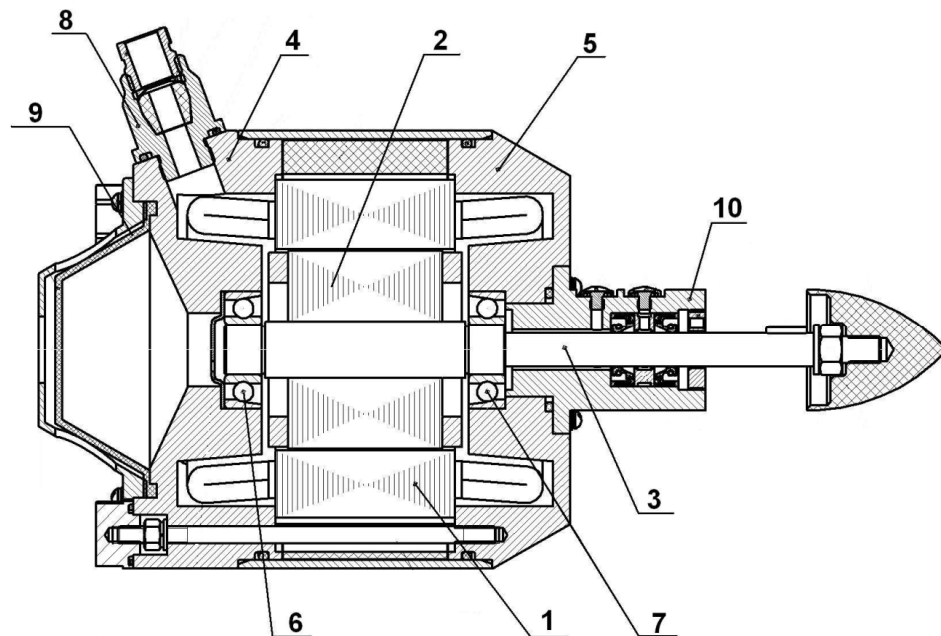


Рисунок 1.14 – Поперечний розріз баророзвантаженого асинхронного двигуна (БАД):

- 1 – статор; 2 – ротор; 3 – вал; 4 – задня кришка двигуна;
5 – передня кришка двигуна; 6, 7 – підшипники; 8 – ущільнювач
електричного вводу; 9 – вирівнювач тиску

Зрозуміло, що при цьому верифіковані імітаційні моделі сприяють суттєвому зниженню кінцевої вартості системи електроруху АПА, що особливо важливо при їх серійному виробництві, різної номенклатури і різному цільовому призначенню.

Крім АД у системах електроруху АПА використовуються щіткові електродвигуни постійного струму (ДПС). Такі електродвигуни мають значний пусковий момент, відмінні регульовальні і динамічні характеристики, а також мають добре відпрацьовані системи керування [6, 102, 121].

Оскільки щіткові ДПС мають непереборні недоліки (частіше технічне обслуговування, швидкий механічний знос, акустичний шум, іскріння, їх робота легко фіксується на великій відстані), все більше застосування у зарубіжних зразках багатоцільових АПА отримують безконтактні двигуни постійного струму (БДПС), інакше – *Brushless DC motor* [99, 105, 126]. У таких електродвигунів, за рахунок використання висококоерцетивних магнітів у системі збудження, у порівнянні з класичними електродвигунами постійного струму і асинхронними електродвигунами, найкращі енергетичні і масогабаритні характеристики [13, 19].

Регульовальні, динамічні і статичні характеристики сучасних автоматизованих електроприводів (АЕП) з векторними способами керування БДПС, близькі до властивостей АЕП, що функціонують на основі класичної високочастотної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) з щітковими ДПТ незалежного збудження.

Подібні рішення провідних виробників електрообладнання (*Mitsubishi, Danfoss, ABB та інших*) мають дуже високі функціонально-технологічні властивості, розвинені системи самодіагностики і захистів, можливості управління по локальній мережі і безліч інших додаткових сервісних функцій.

До систем керування електрорухом багатоцільових АПА, для систем стабілізації на курсі, для систем позиціонування, стабілізації режимів енергетичних підсистем вимагається підвищення точності їх дії [12], оскільки при підвищених швидкостях руху та складних маневрах ці характеристики є головними, що забезпечують виконання складних завдань, покладених на багатоцільові АПА. Безумовно, що актуальності набуває задача удосконалення таких систем АПА, вирішення якої досягається використанням сучасних алгоритмів керування.

Отже, при створенні такого нового для України і високотехнологічного пристрою, як багатоцільовий автономний плавальний апарат, необхідно:

а) забезпечити керування частотою обертання пропульсивного комплексу апарата у відносно невеликому діапазоні при мінімальних капітальних затратах, короткої передпроектної та конструкторсько-технологічної підготовки до виробництва [155];

б) забезпечити можливість роботи маршового електродвигуна відносно невеликої потужності (до 500 Вт) у баророзвантаженому режимі [24, 166];

в) забезпечити виконання ряду додаткових задач і вимог до конструкції, загальної архітектури та функціонування безпілотного апарата, у тому числі до джерела енергії, керування, навігації, стабілізації курсу, позиціонування, зв'язку, роботи додаткових пристроїв, механізмів та ін.;

г) вирішити суперечливу задачу проектування багатоцільового судна [92, 210] – мінімізувати собівартість апарата, забезпечити мінімальні масогабаритні показники при максимально-можливому спеціальному корисному навантаженні, мінімізувати час проектного синтезу і будівництва. Така складна, протирічна і актуальна задача вирішується тільки на основі системного підходу [76, 92, 159, 210].

1.5 Стан розвитку систем підтримки прийняття рішень у галузі проектного синтезу та дослідження складних технічних систем багатоцільового призначення

Найбільш придатними для розв'язання різноманітних задач концептуальної побудови, синтезу і подальшого конструкторського проектування АПА є системи підтримки прийняття рішень (СППР) (*Decision Support System, DSS*) – інтерактивні комп'ютерні автоматизовані системи (програмні і модельні комплекси), що призначені для допомоги та підтримки різноманітних видів дослідницької або проектувальної діяльності при прийнятті рішень стосовно розв'язання конструкторських або дослідницьких проблем

(структурованих або неструктурованих). Застосування СППР забезпечує ґрунтовний та об'єктивний аналіз предметної області при прийнятті рішень в умовах постійного розвитку та ускладнення АПА [219, 229]. За підтримки сучасних обчислювальних засобів і різноманітних підходів до реалізації, СППР повинна надати можливість безпосередньо проектувати, обирати та порівнювати альтернативні варіанти рішень, у тому числі – електрорушія АПА.

Відомі такі СППР, як *CMMS*, (*Computerised Maintenance Management Systems*), *CVSS* (*Computerised Vendor Selection System*), інструменти *BI* і *BA* (*Business Intelligence, Business Analytics*) та інші. Але для українського законодавства та за особливих умов проведення, наприклад, технічного обслуговуванням і ремонту (ТОіР) спецобладнання (спеціальних складних технічних систем (СТС), тендерних закупівель продукції багатоцільового призначення, проектування, експлуатації тощо) такі СППР, найчастіше, є непридатними або вимагають додаткової адаптації і сертифікації, і тому вони не дістали широкого розповсюдження. Крім того, під час функціонування таких СППР відсутні гарантії несанкціонованого доступу (хакінг, кібератаки) та неможливості витоку інформації призначеної для службового користування або з грифом обмеженого доступу (секретності) [15].

Відомо, також, що нечіткі системи підтримки прийняття рішень (НС ППР) [146, 208, 209], це такі системи, що базуються на використанні фаззі-логіки із застосуванням нечітких множин. Основними перевагами використання НС ППР є:

а) можливість ефективного функціонування в умовах невизначеності з одночасним оперуванням якісними і кількісними характеристиками обладнання, параметрами регуляторів тощо;

б) ефективне використання експертних знань з урахуванням наближених розмірковувань експертів;

в) стійкість рішень в умовах дій на НС ППР різноманітних збурень організаційно-технічного характеру, суб'єктивізму.

Підкреслимо, що зараз відсутні типові принципи побудови НС ППР,

для систем багатоцільового призначення, що не уможливлює використання відомих існуючих методів аналізу [203, 219]. У даний час синтез будь-якої нової складної системи чи нового складного продукту або пристрою не відбувається з «нуля». Проектувальники і конструктори прагнуть з максимальним ступенем використати відомі та апробовані рішення, вузли, деталі, комплектуючі, програмне забезпечення та інші складові кінцевого виробу, які вже добре себе зарекомендували у практиці і є доступними для використання. Це відомий, так званий, декомпозиційний [218] підхід до синтезу складних технічних систем, що полягає у використанні широкої номенклатури сумісних окремих вузлів і застосовуваній у більшості випадків, наприклад, при синтезі складних судових технічних систем (СТС) [219, 229]. Саме декомпозиція СТС на складові елементи – розбиття на окремі й сумісні комплектуючі, вузли та блоки, дозволяє не тільки суттєво скоротити терміни проектування, але і помітно знизити витрати, як на проектний синтез, так і на подальше створення всієї системи.

Сучасне проектування будь-якої (технічної, організаційної, еколого-економічної чи іншої) складної системи неминуче стикається з необхідністю вирішення низки проблем і суперечностей, що приводить до необхідності знаходження компромісного рішення між безліччю необхідних та бажаних параметрів і вимог, що пред'являються до системи.

Наприклад, для більшості СТС, особливо – багатоцільового призначення, зазвичай, суперечать такі вимоги, як мінімальна вартість і необхідність забезпечення максимальної енергоефективності системи, надійність системи і її масогабаритні показники, а також інші суперечливі, іноді взаємовиключні, вимоги. Економічність, керованість, швидкодія, маса, габарити, ціна, екологічність, надійність, простота експлуатації, технічного обслуговування і ремонту, ергономічність, функціональність і інші вимоги, що пред'являються до судових СТС, практично завжди вступають між собою у протиріччя [16].

Аналогічних протиріч, суперечливих проблем, що виникають при синтезі СТС, можна виявити цілий ряд [145, 219, 229], при цьому задача

«найкращої» побудови конструкції АПА суттєво ускладнюється. Так, комп'ютерна система керування (керуючий контролер) чи системний блок керуючого комп'ютера містить наступні основні вузли: «материнську» плату, процесор, оперативну пам'ять, жорсткий диск, блок живлення, системи вводу/виведення тощо. Кожен з названих вузлів виробляється десятками, якщо не сотнями виробників, у десятках модифікацій і широкій номенклатурі, з різними параметрами і цінами. Композицій (об'єднань, комбінацій) таких вузлів, що дозволяють створити працездатну комп'ютерну систему, величезна кількість і, що очевидно, кінцеві техніко-експлуатаційні характеристики, надійність і ціна системних блоків при різних з'єднаннях вузлів суттєво розрізняються. Саме тому ї стає питання, що таке «найкраща» система, конструкція. За одним-єдиним показником або критерієм це очевидне рішення, наприклад, знаходження мінімальної маси або вартості складових елементів системи. Але якщо змінити вимоги до максимального/мінімального значення того або іншого параметру, до окремої характеристики чи окремого критерію системи (тобто послабити до неї вимоги, піти на компроміс), то можлива поява таких комбінацій елементів системи, конструкції, яка буде суттєво кращою за іншими параметрами. При цьому досягнення кінцевих параметрів методами пошуку екстремумів функцій майже недосяжне.

Таким чином, розробка методів розрахунку, що дозволяють не тільки аргументувати прийняття того чи іншого конструкторсько-технологічного рішення при синтезі складних систем різного цільового призначення, а й забезпечувати у певному сенсі «найкращий» компромісний результат синтезу складної технічної системи є важливою, проблемною науково-технічною і практичною задачею.

Отже, з метою підвищення ефективності процесів експлуатації, ремонту та технічного обслуговування СТС багатоцільового призначення доцільно застосування у СППР, де використовуються специфічні оцінки технічних, технологічних, еколого-економічних проектів, показників, продукції

подвійного призначення, спеціальних транспортних засобів, а також під час проведення тендерних закупівель, під час вирішення завдань забезпечення ТОiP, організації еколого-економічних експертиз, тощо, різнорідних, сформульованих експертами, інтегрованих показників якості [15, 16], при чому таких, які можуть бути вираженими у кількісній формі їх представлення, незалежно от природи їх опису.

Таким чином, створення високоефективних автономних плавальних апаратів 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 АПА на основі методу «компромісу», тобто урахував, що незначне зниження вимог відносно мінімаксу за одним параметром (критерієм) може привести до одночасного покращання інших параметрів АПА;

в) використання частково-інваріантних до вітро-хвильових збурень принципів стабілізації курсу;

г) використання принципів модульності та мінімальної апаратної надмірності для визначення елементів СЕУ, ПК і АСК у залежності від технологічного завдання;

д) використання ідеї «рою» і «москітних» принципів функціонування при забезпеченні режимів підзарядки системи живлення АПА у морі від апарата-донора;

е) визначення елементів СЕУ, ПК і АСК АПА для військових цілей, наприклад, за принципом мінімальної собівартості зі збереженням функціональних можливостей (апарат-камікадзе, брандер).

Аналіз сучасного стану досліджень, підходів та методології [45, 79, 108, 112], вирішення задач підвищення ефективності функціонування АПА різного призначення (міжнародні концерни *Wartsila*, *Danfoss*) не дозволяють з упевненістю заявляти про вирішення проблеми зниження строків розробки, підвищення ефективності і експлуатаційних характеристик, універсальності

застосування, принципів побудови енергетичної установки, обрання складових елементів, зниження собівартості і габаритів для багатоцільових АПА малої водотоннажності.

Більшість наявних рекомендацій для оцінювання характеристик СЕУ ПК, розрахунку елементів електродвигунів і визначення їх типу (КБ «Південь», Україна), комплектації ПК рушіями різних типів отримані на базі емпіричного досвіду проектування та експлуатації, а також шляхом статистичної обробки інформації по суднах (ПАО «Чорноморсуднопроект», Україна, Науково-дослідний проектно-конструкторський інститут морського флоту України ДП «УкрНДІМФ», Україна).

Узагальнення результатів відомих досліджень експлуатаційних характеристик АПА [53, 94, 127, 128] і наведені у них методи не дозволяють з достатньою точністю виконувати розрахунки ходових і динамічних якостей АПА різного призначення. Модельні і натурні випробування гребних гвинтів, відомі наведені емпіричні методи розрахунку і проектування рушіїв різного типу, викликають складні, не вирішені питання взаємодії всіх енергетичних і керуючих елементів АПА [53, 79, 84, 94]. Суттєвий вплив на ефективність функціонування всіх основних елементів АПА (СЕУ, ПК і СК) мають гідрометеорологічні фактори і невизначеності, пов'язані з районом плавання, порою року, логістикою, цілю, головним завданням тощо.

Таким чином [45, 52, 79, 84, 94, 108, 112, 127, 128]:

а) питанням обґрунтування типу, визначення квазіоптимальної (раціональної) архітектури та основних характеристик ПК при виконанні проектів СЕУ не приділено достатньої уваги, а більшість існуючих методів оцінки ефективності електроенергетичних установок, що застосовуються поза межами системного підходу до проектування, не завжди відповідають сучасним вимогам і не мають методологічної підтримки запропонованих рішень [45, 52, 79, 108, 112, 128];

б) перспективним напрямком при виконанні робіт, пов'язаних з підвищенням загальної ефективності функціонування електроенергетичних установок, ПК та систем керування АПА, є використання сучасних

середовищ імітаційного моделювання та *CAD/CAM/CAE*-систем, що дозволяє урахувати випадкові чинники і динаміку зовнішнього середовища на роботу систем стабілізації, наприклад, курсу багатоцільових АПА [94, 108, 128];

в) актуальними для багатоцільових АПА є питання підвищення обрання складу елементів енергетичних установок, ПК і СК при гарантованому виконанні судном, у тому числі – особливих, технологічних завдань [52, 127, 128];

г) недостатньо висвітлені питання, пов'язані з автоматизацією робіт з проектування та технологічної підготовки виробництва у проектах підвищення ефективності функціонування енергетичних систем, ПК і СК АПА і багатоцільових суден.

1.6 Висновки до розділу 1

1. Аналіз світового тренду розвитку автономних безпілотних систем у морської галузі та різноманіття функції і задач, які можна вирішувати із застосуванням роботів та роботизованих морських систем, а також забезпечення безпеки мореплавства під час комерційної експлуатації *Smart Ship* або автономних суден доводить актуальність дисертаційного дослідження.

2. Аналіз сучасного стану розвитку багатоцільових автономних плавальних апаратів, морських безпілотних комплексів, автоматизованих систем керування технічними системами і електрорушійними комплексами, доводить, що: а) головною тенденцією їх удосконалення і подальшого розвитку є практичне злиття цивільної і військової галузей проектування і побудови; б) набуває гострої необхідності розробка таких методів синтезу конструкцій, які враховують багатокритеріальність під час вибору елементів пропульсивних установок для цих об'єктів водного транспорту

3. Встановлено, що створення високоефективних автономних плавальних апаратів 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 пропульсивного комплексу і елементів системи керування автономних плавальних апаратів на основі методу «компромісу», тобто незначним зниженням вимог за одним параметром може привести до одночасного покращання інших параметрів; *в)* використання частково-інваріантних до вітрово-хвильових збурень принципів стабілізації курсу автономних плавальних апаратів; *г)* використання принципів модульності та мінімальної апаратної надмірності для визначення елементів систем керування електрорушійним комплексом у залежності від технологічного завдання апарата.

Основні наукові результати розділу опубліковані у [1–25, 18, 19, 21–26, 28, 38].

РОЗДІЛ 2

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЗАСТОСОВАНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ МЕТОДІВ, АЛГОРИТМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ СИНТЕЗУ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМ АПА І ЗАГАЛЬНА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Особливості процесів моделювання руху надводних морських транспортних засобів

Як відомо, класична кінематика розглядає геометричні аспекти руху після визначення сил і моментів і, відповідно, прискорень. У загальному і найбільш розповсюдженому припущенні, морський транспортний засіб (наприклад – корпус АПА), являє собою тверде тіло із 6 ступенями свободи (6DoF). Це пояснюється тим, що для визначення положення і орієнтації АПА необхідні 6 незалежних координат – три для осьового переміщення і три для кутового переміщення (рис. 2.1, а): «*surge*» (поздовжньо-горизонтальна) – зміщення в напрямку X ; «*sway*» (поперечно-горизонтальна) – зміщення у напрямку Y ; «*heave*» (вертикальна) – зміщення у напрямку Z ; «*roll*» (бортова качка) – обертання навколо вісі X ; «*pitch*» (кільова качка) – обертання навколо вісі Y ; «*yaw*» (нишпорення) – обертання навколо вісі Z .

У морській навігації прийнято використовувати дві основні системи координат: систему корпусу, зв'язану з транспортним засобом (що застосовується для керування всіма силами і прискореннями, які виникають у засобі) і систему, зв'язану із Землею, яка застосовується для розрахунку параметрів руху транспортного засобу. Існує кілька подібних систем: інерціальна система відліку, центрована відносно Землі (*ECI*-система); орієнтована на Землю фіксована система координат (*ECEF*-система) і координатна система *The North-East-Down system* (*NED*-система), яка визначає розташування координат відносно еліпсоїду Землі (у подальшому використана *NED*-система (рис 2.1, б) [133, 176]).

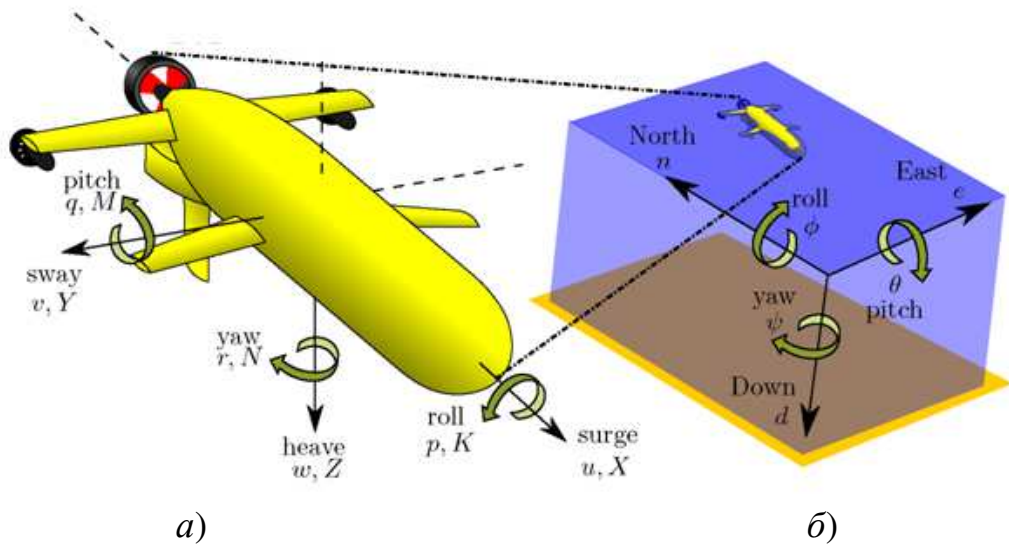


Рисунок 2.1 – Типові системи координат: система корпусу (а);
NED-система (б)

Система корпусу має початок в центрі плавучості (ЦП) транспортного засобу: вісь X вказує на ніс, вісь Y – на правий борт, а вісь Z – на дно. *NED*-система розташована на поверхні моря: вісь X спрямована на північ, вісь Y – на схід, а вісь Z – униз. Положення, швидкості та сили для АПА визначаються так:

$$\left. \begin{aligned}
 p^n &= \begin{bmatrix} n \\ e \\ d \end{bmatrix} \text{ – } NED\text{-положення;} \\
 v^b &= \begin{bmatrix} u \\ \vartheta \\ \omega \end{bmatrix} \text{ – лінійна швидкість твердого тіла;} \\
 f^b &= \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \text{ – сила твердого тіла; } \Theta = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \text{ – положення (кути Ейлера);} \\
 \omega^b &= \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \text{ – кутова швидкість твердого тіла;} \\
 m^b &= \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix} \text{ – крутний момент твердого тіла.}
 \end{aligned} \right\} (2.1)$$

Рух АПА з 6 ступенями свободи описується наступними векторами:

$$\eta = \begin{bmatrix} p^n \\ \Theta \end{bmatrix}; \quad v = \begin{bmatrix} v^b \\ \omega^b \end{bmatrix}; \quad \tau = \begin{bmatrix} f^b \\ m^b \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Матриця обертання R використовується для обертання координат з метою переходу від однієї системи до іншої. Параметри обертання – це кути Ейлера: крену *roll* (ϕ), курсу *pitch* (θ) і нишпорення *yaw* (ψ). Помноживши матрицю обертання на кожен із кутів, отримаємо узагальнену формулу перетворення системи корпусу у *NED*-систему:

$$R_b^n(\Theta) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\cos\phi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & -\cos\psi\sin\phi + \sin\theta\sin\psi\cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

де нижній індекс b і верхній індекс n позначають перехід системи корпусу до *NED*-системі. Матриця обертання R ортогональна, і, отже, зворотна матриця обертання визначається як $R^{-1} = R^T$.

Динаміка має справу з силами і моментами, які генерують прискорення. Вони розраховані у системі корпусу і приведені у залежності від вектора швидкості v . Рівняння динаміки має вигляд:

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + g_0 + w, \quad (2.4)$$

де M – матриця інерції системи (включаючи додану масу); $C(v)v$ – доцентрова матриця Коріоліса (включаючи додану масу); $D(v)v$ – матриця демпфірування; $g(\eta)$ – вектор гравітаційних/плавучих сил і моментів; τ – вектор керуючих входів; g_0 – вектор, який використовується для попередньої обробки (контроль баласту); w – вектор зовнішніх збурень (вітер, хвилі і течія). Складові (2.4) враховують інерційний і неінерційний вплив твердого тіла транспортного засобу і вплив рідини на АПА.

Динаміка твердого тіла повинна враховувати коріолісовий і відцентровий ефекти, викликані тим, що корпус не є інерційним:

$$M_{\text{тг}} \dot{v} + C_{\text{тг}} v = \tau_{\text{гидр}}, \quad (2.5)$$

де $M_{\text{тТ}}$ – матриця інерції твердого тіла; $C_{\text{тТ}}$ – доцентрова матриця Коріоліса твердого тіла, $\tau_{\text{гїдр}}$ – узагальнений вектор зовнішніх сил і моментів. Матриці $M_{\text{тТ}}$ і $C_{\text{тТ}}$ представлені рівняннями (2.6) і (2.7). Матриця $M_{\text{тТ}}$ не залежить від стану вектора \mathbf{v} .

$$M_{\text{тТ}} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

$$C_{\text{тТ}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_g q + z_g r) & m(y_g p + \omega) & m(z_g p - \vartheta) \\ m(x_g q - \omega) & -m(z_g r + x_g p) & m(z_g q + u) \\ m(x_g r + \vartheta) & m(y_g r - u) & -m(x_g p + y_g q) \\ & m(y_g q + z_g r) & -m(x_g q - \omega) & -m(x_g r + \vartheta) \\ & -m(y_g p + \omega) & m(z_g r + x_g p) & -m(y_g r - u) \\ & -m(z_g p - \vartheta) & -m(z_g q + u) & m(x_g p + y_g q) \\ & 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_y q \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r & & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_y q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_x p & & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

де m – маса АПА; I – 3×3 тензор інерції; $(x_g; y_g; z_g)$ – координати центру ваги.

Гідродинамічні сили і крутний момент, викликані потоком води, складно розрахувати, оскільки вода є рідиною у відкритому просторі. У класичній теорії моделювання для гідродинамічних сил, зазвичай, використовуються два способи параметризації: усічене послідовне розкладання у ряд Тейлора з використанням членів до третього порядку і використання модулів членів другого порядку з розрахунком сил як суми 5 компонентів:

$$\tau_{\text{гїдр}} = \tau_{1w} + \tau_{2w} + \tau_p + \tau_{\text{в'яз}} + \tau_{\text{г.ст}}, \quad (2.8)$$

де

– сили збудження хвиль першого порядку τ_{1w} являють собою середнє значення коливальних сил, викликаних хвилями;

– сили збудження хвиль другого порядку τ_{2w} включають середні дрейфові навантаження, хвильові навантаження, які повільно змінюються (різницеві частоти) і швидко змінюються (сумарні частоти);

– радіальні сили τ_p , що з'являються як наслідок зміни імпульсів рідини і хвиль, що виникають в результаті руху корпусу. Ці сили пропорційні прискоренням і швидкостям судна. Поділяються на сили приєднаної маси (сили, пропорційні прискоренням) і сили потенціалу демпфірування (сили, пропорційні швидкостям);

– сили в'язкості $\tau_{в'яз}$, як нелінійні сили демпфірування, виникають через нелінійні явища, обумовлені ефектами в'язкості. За допомогою цих сил кінетична енергія корпусу АПА передається рідині (тертя обшивки, поділ потоку, утворення вихорів);

– гідростатичні сили $\tau_{г.ст}$, що виникають із-за сили тяжіння і плавучості, забезпечують рівновагу судна (відновлюючі сили).

Інший спосіб представити цю суму сил полягає в наступному:

$$\tau_{г\dot{д}р} = M_{доб} \dot{v} - C_{доб} v - D_{демп} v - g(\eta) + g_0 + \tau + w, \quad (2.9)$$

де матриці $M_{доб}$ і $C_{доб}$ представляють собою приєднані маси і описані рівняннями (2.11)–(2.13). Матриця $D_{демп}$ є потенціалом демпфірування. Представимо її як суму лінійного $D_{л}$ і нелінійного $D_{н}$ процесів демпфірування. Матриця лінійного демпфірування $D_{л}$ описана рівнянням (2.14). Матриця нелінійного демпфірування $D_{н}$ є матрицею, коефіцієнти якої залежать від числа Рейнольдса. Матриця описується рівнянням (2.15), причому вважаємо, що матриці $M_{доб}$ і $D_{л}$ не залежать від стану вектора v .

Описані матриці залежать від декількох коефіцієнтів, які визначаються частковою похідною сили (X , Y або Z) або крутного моменту (K , M або N), що приводить у рух транспортний засіб, відносно швидкості або прискорення:

$$X_{\dot{u}} = \frac{\partial X}{\partial \dot{u}} \Big|_{\dot{u}=0}, \quad X_u = \frac{\partial X}{\partial u} \Big|_{u=0}, \quad X_{|u|u} = \frac{\partial^2 X}{\partial u \partial |u|} \Big|_{u=0}. \quad (2.10)$$

$$M_{\text{доб}} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{\vartheta}} & X_{\dot{\omega}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{\vartheta}} & Y_{\dot{\omega}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{\vartheta}} & Z_{\dot{\omega}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{\vartheta}} & K_{\dot{\omega}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{\vartheta}} & M_{\dot{\omega}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{\vartheta}} & N_{\dot{\omega}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

$$C_{\text{доб}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

де

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= X_{\dot{u}}u + X_{\dot{\vartheta}}\vartheta + X_{\dot{\omega}}\omega + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \\ a_2 &= Y_{\dot{u}}u + Y_{\dot{\vartheta}}\vartheta + Y_{\dot{\omega}}\omega + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \\ a_3 &= Z_{\dot{u}}u + Z_{\dot{\vartheta}}\vartheta + Z_{\dot{\omega}}\omega + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \\ b_1 &= K_{\dot{u}}u + K_{\dot{\vartheta}}\vartheta + K_{\dot{\omega}}\omega + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \\ b_2 &= M_{\dot{u}}u + M_{\dot{\vartheta}}\vartheta + M_{\dot{\omega}}\omega + M_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \\ b_3 &= N_{\dot{u}}u + N_{\dot{\vartheta}}\vartheta + N_{\dot{\omega}}\omega + N_{\dot{p}}p + N_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

$$D_{\pi} = - \begin{bmatrix} X_u & X_{\vartheta} & X_{\omega} & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_{\vartheta} & Y_{\omega} & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_{\vartheta} & Z_{\omega} & Z_p & Z_q & Z_r \\ K_u & K_{\vartheta} & K_{\omega} & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_{\vartheta} & M_{\omega} & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_{\vartheta} & N_{\omega} & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)\sin\theta \\ -(W - B)\cos\theta\sin\phi \\ -(W - B)\cos\theta\cos\phi \\ -(y_g W - y_b B)\cos\theta\cos\phi + (z_g W - z_b B)\cos\theta\sin\phi \\ (z_g W - z_b B)\sin\theta + (x_g W - x_b B)\cos\theta\cos\phi \\ -(x_g W - x_b B)\cos\theta\sin\phi - (y_g W - y_b B)\sin\theta \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

де W і B – маса і плавучість АПА, відповідно, $(x_g; y_g; z_g)$ – центр ваги, $(x_b; y_b; z_b)$ – центр плавучості.

На рис. 2.2 показано співвідношення між силою X і швидкістю руху u . За відсутності будь-якої тяги гвинта сила X зменшується через збільшення опору, якщо швидкість збільшується.

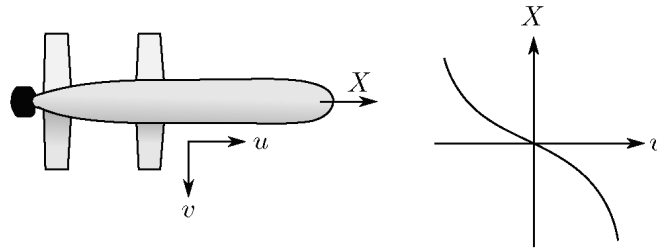


Рисунок 2.2 – Залежність сили X від швидкості руху u

2.1.1. Спрощена $3DoF$ модель горизонтального руху АПА

Якщо АПА рухається тільки на поверхні води, тому математична модель його руху спрощується до 3 ступенів свободи ($3DoF$): поздовжньо-горизонтальна і поперечно-горизонтальна складові та нищпорення (рухом у інших координатах нехтуємо). Таким чином, вектори положення і швидкості мають наступний вигляд:

$$\eta = \begin{bmatrix} n \\ e \\ \psi \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} u \\ \vartheta \\ r \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Припускаючи, що складова y_g дорівнює нулю, матриці твердого тіла можна спростити:

$$M_{\text{TT}} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_g \\ 0 & mx_g & I_z \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

$$C_{\text{TT}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(x_g r + \vartheta) \\ 0 & 0 & tu \\ m(x_g r + \vartheta) & -tu & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Через симетрію площині xz можна знехтувати декількома коефіцієнтами, залишаючи тільки коефіцієнти сили X відносно швидкості руху вперед і коефіцієнти складових Y і N відносно швидкостей ϑ і r . Крім того, нехтуючи матрицею лінійного демпфірування $D_{\text{л}}$, матриці гідродинамічних сил і моментів спрощуються наступним чином:

$$M_{\text{доб}} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{\vartheta}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & N_{\dot{\vartheta}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad (2.19)$$

$$C_{\text{доб}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_{\dot{\vartheta}}\vartheta + Y_{\dot{r}}r \\ 0 & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ -(Y_{\dot{\vartheta}}\vartheta + Y_{\dot{r}}r) & X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

$$D_{\text{н}} = \begin{bmatrix} X_{|u|u} |u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_{|\vartheta|\vartheta} |\vartheta| & Y_{|r|r} |r| \\ 0 & N_{|\vartheta|\vartheta} |\vartheta| & N_{|r|r} |r| \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

Приймаємо $g(\eta) = [0 \ 0 \ 0]^T$ при $\phi = \theta = 0$.

У випадку, наведеному у звіті 2018 р. *Guyana Labour Market Quarterly Bulletin*, на прикладі АПА типу *Guanay-II* керуючі входи τ складаються з сили, що забезпечує стрибкоподібний рух з використанням трьох рушіїв, і крутного моменту для обертального руху з використанням бічних рушіїв:

$$\tau = \begin{bmatrix} \text{Prop} \\ 0 \\ \text{Torque} \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \text{Prop} &= X_{\text{гл}} + X_{\text{л}} + X_{\text{пр}} \\ \text{Torque} &= a_n (X_{\text{л}} - X_{\text{пр}}) \end{aligned}, \quad (2.22)$$

де a_n – відстань від бічних рушіїв до центральної вісі, $X_{\text{гл}}$, $X_{\text{л}}$ і $X_{\text{пр}}$ – сили основного, лівого і правого рушіїв, відповідно.

На підставі рівнянь (2.4), (2.5) і (2.8) і у припущенні, що збурення w несуттєві, динаміка АПА описується наступним чином:

$$(M_{\text{тг}} + M_{\text{доб}})\dot{v} + (C_{\text{тг}} + C_{\text{доб}})v + D_{\text{н}}v = \tau, \quad (2.23)$$

2.1.2. Стабілізація руху АПА при його русі уперед

Під стійкістю системи розуміють її повернення до вихідного стану рівноваги після навіть мінімального порушення рівноваги. Розглядаючи випадок руху АПА уперед, без відхилення від наміченого курсу або будь-якої програми крутного моменту, АПА вважаємо стійким на курсі у разі підтримки прямого курсу після відхилення і нестійким, якщо АПА після відхилення не може повернутися на заданий курс (рис. 2.3). Застосовуємо параметр стійкості C , який визначається як

$$C = Y_{\vartheta}(N_r - m x_g u) + N_{\vartheta}(m u - Y_r). \quad (2.24)$$

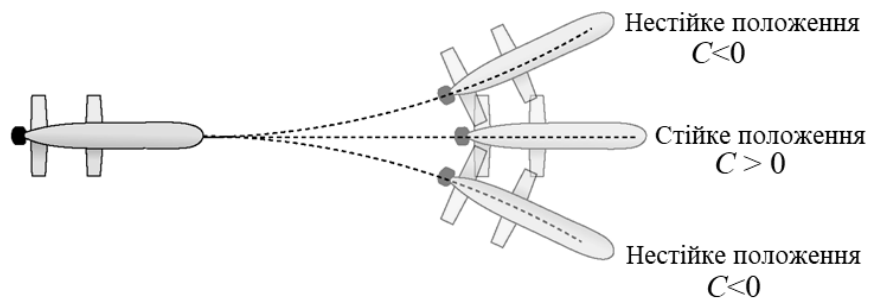


Рисунок 2.3 – Стійкість АПА при русі уперед

Щоб розрахувати коефіцієнти рівнянь, що описують рух АПА, необхідно спочатку визначити профіль апарату (масу, плавучість тощо).

Зовнішня архітектура АПА розроблена з використанням рівнянь Майрінген [184], які дають хороші навігаційні характеристики для заданих розмірів. Ці рівняння засновані на наступних параметрах (рис. 2.4): a – довжина корпусу; b – довжина середньої частини корпусу. Ця частина має постійну протяжність по вісі X ; c – довжина хвостової частини АПА; n – експоненціальний параметр, яким можна варіювати, щоб отримати різні форми тіла; 2θ – кут при вершині хвоста АПА; d – максимальний діаметр корпусу АПА.

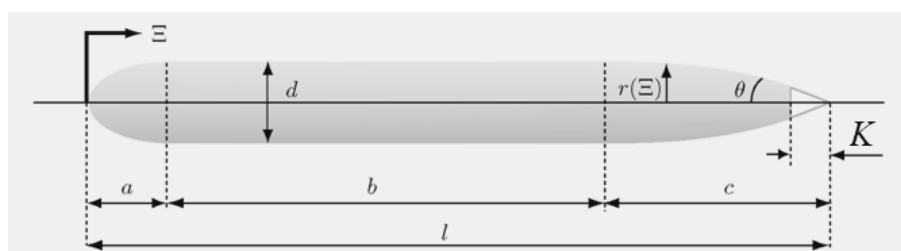


Рисунок 2.4 – Профіль Майрінгена: радіус корпусу АПА, як функція осьового положення

Припускаємо, що початок відліку координат знаходиться у носовій частині. Радіуси, що визначають корпус на носі, визначаються як

$$r(\Xi) = \frac{1}{2}d \left[1 - \left(\frac{\Xi - a}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (2.25)$$

де $r(\Xi)$ – радіус для різних відстаней; Ξ – відстань, виміряна на носі АПА. Кормовий профіль визначається як

$$r(\Xi) = \frac{1}{2}d - \left[\frac{3d}{2c^2} - \frac{\text{tg}\theta}{c} \right] (\Xi - l_f)^2 + \left[\frac{d}{c^3} - \frac{\text{tg}\theta}{c^2} \right] (\Xi - l_f)^3. \quad (2.26)$$

АПА побудований на контурі корпусу типу *Myring hull profile* (близько до наведеного на рис. 2.4), основні параметри якого наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри *Myring hull profile* для багатоцільового АПА

Параметр	Величина	Одиниці Виміру	Опис
a	0,325	М	Довжина корпусу
b	1,12	М	Довжина середньої частини корпусу
c	0,924	М	Довжина хвостовій частині
K	0,07	М	Кормове зміщення
n	2	-	Експоненціальний коефіцієнт
θ	0,436	Рад	Кормової кут
d	0,326	М	Максимальний діаметр корпусу
l	2,3	М	Загальна довжина корпусу

Попередня розрахункова маса АПА становить 94,8 кг, але, оскільки апарат може бути зануреним і у баласті, необхідно враховувати баластну воду між водонепроникним модулем і конструкцією корпусу. Кількість баластної води розраховується наступним чином.

Обсяг всередині конструкції корпусу може бути розрахований за допомогою радіусів рівнянь (2.25) і (2.26) з вирахуванням 5 мм товщини:

$$V_{\text{корп}} = \int_{x_{\text{нос}}}^{x_{\text{корм}}} \pi (r(x) - 0,005)^2 dx = 0,1473 \text{ м}^3. \quad (2.27)$$

Водонепроникний модуль складається з циліндра діаметром 0,25 м і довжиною 1,09 м:

$$V_{\text{цил1}} = \int_{x_{\text{нос}}}^{x_{\text{корм}}} \pi r^2 h = 0,0535 \text{ м}^3. \quad (2.28)$$

Таким чином, визначені всі необхідні основні технічні параметри АПА, які необхідні для побудови математичної моделі апарата при керуванні його електрорушіями у режимі стабілізації заданого курсу (надводний режим).

2.2 Теоретичне вирішення проблем синтезу високоякісних систем керування рухом АПА за допомогою електрорушіїв

Морськими дослідниками приділяється особлива увага синтезу високоякісних, надійних і простих у застосування систем керування та автоматичних регуляторів для АПА, наприклад, частоти обертання гвинта, напруги живлення, курсового куту тощо. Особливому класу систем керування для АПА – систем, з частковою інваріантністю до збурень, на погляд автора приділено недостатньо уваги, але загальним принципам розвитку й становленню теорії інваріантності сприяють фундаментальні дослідження Г. В. Щипанова, Н. Н. Лузіна, В. С. Кулеб'якіна, Б. Н. Петрова, А. Г. Івахненко, А. І. Кухтенко, П. І. Чинаєва і інших відомих науковців. Ці дослідження є основою розробки декількох методів синтезу нелінійних інваріантних систем керування. Наприклад, у [90] викладається теорія нелінійної інваріантності з позицій штучного роз'єднання системи диференціальних рівнянь, у роботах інших авторів застосовується метод малого параметра. Теорія інваріантності, навіть при коректній постановці завдання керування, дозволяє мінімізувати тільки змушений рух системи, а вільний рух, що залежить від початкових умов, зберігається. Це приводить до постановки й розв'язку завдання синтезу за допомогою спільного використання принципу інваріантності і теорії оптимального керування.

Викладемо коротко сутність використовованого у дослідженні методу синтезу розімкнених зв'язків, запропонованого у [143] і розвиненого у роботах [95, 110, 131, 141].

Нехай система керування рухом, наприклад, АПА, описується впорядкованою системою диференціальних рівнянь загального виду:

$$\left. \begin{aligned} F_1(t, X, Y, Z) &= f(t) \\ F_2(t, X, Y, Z) &= 0 \\ F_3(t, X, Y, Z) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.29)$$

де X, Y, Z – координати, відповідно: регульована, чутливо-підсилювального елемента й інших координат об'єкта, використовуваних для керування; $f(t)$ – зовнішнє збурювання (навантаження).

Щодо функцій $F_1(\dots)$, $F_2(\dots)$, $F_3(\dots)$ передбачається, що вони диференційовані за своїми аргументами:

$$X = (x, \dot{x}, \ddot{x}), Y = (y, \dot{y}, \ddot{y}), Z = (z, \dot{z}, \ddot{z})$$

На основі класичних праць Г. В. Щипанова, Н. Н. Лузіна і Б. Н. Петрова, зіставимо системі (2.29) систему (2.30):

$$\left. \begin{aligned} F_1(X, Y, Z) &= \alpha f(t) \\ F_2(X, Y, Z) &= 0 \\ F_3(X, Y, Z) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.30)$$

де α – параметр, що характеризує величину (інтенсивність) впливу, що збурює.

Відомо, що система керувань (2.30) буде інваріантною за параметром x відносно впливу, що збурює, $f(t)$, якщо параметр x , обумовлений цією системою рівнянь (2.30) не буде залежати від параметра α , тобто, у математичній формі, ця умова має вигляд:

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha} \equiv 0; \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (2.31)$$

Слід зазначити, що комплекс $\alpha f(t)$ нероздільний, тому незалежність x від α одночасно означає й незалежність від збурювання $f(t)$.

Нелінійна система керування, що працює за комбінованим принципом, може бути описана системою диференціальних рівнянь у загальному виді:

$$\left. \begin{aligned} F_1(t, X, Y, Z) &= \alpha f(t) \\ F_2(t, X, Y, Z) &= K_2(t, Y, Z, f(t), f'(t) \dots f^n(t)) \\ F_3(t, X, Y, Z) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.32)$$

де $K_2(\dots)$ характеризує зв'язок за збурюванням.

Диференціюючи (2.32) за параметром α , одержимо основну систему керування:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}(D) \frac{\partial x}{\partial \alpha} + a_{12}(D) \frac{\partial y}{\partial \alpha} + a_{13}(D) \frac{\partial z}{\partial \alpha} &= f(t) \\ a_{21}^*(D) \frac{\partial x}{\partial \alpha} + a_{22}^*(D) \frac{\partial y}{\partial \alpha} + a_{23}(D) \frac{\partial z}{\partial \alpha} &= K_2(D) f(t) \\ a_{31}(D) \frac{\partial x}{\partial \alpha} + a_{32}(D) \frac{\partial y}{\partial \alpha} + a_{33}(D) \frac{\partial z}{\partial \alpha} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.33)$$

де:

$$\begin{aligned} a_{11}(D) &= \frac{\partial F_1}{\partial x} D^0 + \frac{\partial F_1}{\partial \dot{x}} D^1 + \frac{\partial F_1}{\partial \ddot{x}} D^2; & a_{12}(D) &= \frac{\partial F_1}{\partial y} D^0 + \frac{\partial F_1}{\partial \dot{y}} D^1 + \frac{\partial F_1}{\partial \ddot{y}} D^2; \\ a_{13}(D) &= \frac{\partial F_1}{\partial z} D^0 + \frac{\partial F_1}{\partial \dot{z}} D^1 + \frac{\partial F_1}{\partial \ddot{z}} D^2; & a_{21}(D) &= \frac{\partial F_2}{\partial x} D^0 + \frac{\partial F_2}{\partial \dot{x}} D^1 + \frac{\partial F_2}{\partial \ddot{x}} D^2; \\ a_{22}(D) &= \frac{\partial F_2}{\partial y} D^0 + \frac{\partial F_2}{\partial \dot{y}} D^1 + \frac{\partial F_2}{\partial \ddot{y}} D^2; & a_{23}(D) &= \frac{\partial F_2}{\partial z} D^0 + \frac{\partial F_2}{\partial \dot{z}} D^1 + \frac{\partial F_2}{\partial \ddot{z}} D^2; \\ a_{31}(D) &= \frac{\partial F_3}{\partial x} D^0 + \frac{\partial F_3}{\partial \dot{x}} D^1 + \frac{\partial F_3}{\partial \ddot{x}} D^2; & a_{32}(D) &= \frac{\partial F_3}{\partial y} D^0 + \frac{\partial F_3}{\partial \dot{y}} D^1 + \frac{\partial F_3}{\partial \ddot{y}} D^2; \\ a_{33}(D) &= \frac{\partial F_3}{\partial z} D^0 + \frac{\partial F_3}{\partial \dot{z}} D^1 + \frac{\partial F_3}{\partial \ddot{z}} D^2; & a_{21}^*(D) &= a_{21}(D) - K_{21}(D); \\ a_{22}^*(D) &= a_{22}(D) - K_{22}(D); & a_{23}^*(D) &= a_{23}(D) - K_{23}(D); \\ K_{21}(D) &= \frac{\partial K_2}{\partial x} D^0 + \frac{\partial K_2}{\partial \dot{x}} D^1 + \frac{\partial K_2}{\partial \ddot{x}} D^2; & K_{22}(D) &= \frac{\partial K_2}{\partial y} D^0 + \frac{\partial K_2}{\partial \dot{y}} D^1 + \frac{\partial K_2}{\partial \ddot{y}} D^2; \\ K_{23}(D) &= \frac{\partial K_2}{\partial z} D^0 + \frac{\partial K_2}{\partial \dot{z}} D^1 + \frac{\partial K_2}{\partial \ddot{z}} D^2; & K_2(D) &= \sum_{i=0}^{i=m} \frac{\partial K_2}{\partial [\alpha f^i(t)]} D^i. \end{aligned}$$

Дотримуючись умови (2.31), систему (2.33) запишемо у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} a_{12}(D) \frac{\partial y}{\partial \alpha} + a_{13}(D) \frac{\partial z}{\partial \alpha} &= f(t) \\ a_{22}^*(D) \frac{\partial y}{\partial \alpha} + a_{23}(D) \frac{\partial z}{\partial \alpha} &= K_2^*(D) f(t) \\ a_{32}(D) \frac{\partial y}{\partial \alpha} + a_{33}(D) \frac{\partial z}{\partial \alpha} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

Для одержання умов інваріантності подіємо поки невизначеними операторами $U_1(D)$ на перше рівняння системи (2.34), а $U_3(D)$ – на третє керування й результат віднімемо із другого. Після цього одержимо:

$$\begin{aligned} & (a_{22}^*(D) - U_1(D)a_{12}(D) - U_3(D)a_{32}(D)) \frac{\partial y}{\partial \alpha} + (a_{23}^*(D) - U_1(D)a_{13}(D) - \\ & - U_3(D)a_{33}(D)) \frac{\partial z}{\partial \alpha} = (K_2^*(D) - U_1(D)) \cdot f(t) \end{aligned} \quad (2.35)$$

Як видно з першого рівняння системи (2.34) величини $\frac{\partial y}{\partial \alpha}$ й $\frac{\partial z}{\partial \alpha}$ одночасно у нуль звернутися не можуть, тому користуючись невизначеністю операторів $U_1(D)$ і $U_3(D)$, на підставі (2.35) можна записати:

$$\left. \begin{aligned} & a_{22}^*(D) - U_1(D)a_{12}(D) - U_3(D)a_{32}(D) \equiv 0 \\ & a_{23}^*(D) + U_1(D)a_{13}(D) - U_3(D)a_{33}(D) \equiv 0 \\ & K_2^*(D) - U_1(D) \equiv 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.36)$$

Отримані співвідношення і є умовами інваріантності нелінійних комбінованих систем у диференціальній формі. У випадку, якщо система керування, що працює по комбінованому принципу є лінійною, умови інваріантності можуть бути отримані за нижчеподаною методикою.

Нехай система керування рухом АПА описується наступною впорядкованою системою диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} & a_{11}(D)x(t) + a_{12}(D)y(t) + a_{13}(D)z(t) = b_1(D)f(t) \\ & a_{21}(D)x(t) + a_{22}(D)y(t) + a_{23}(D)z(t) = b_2(D)f(t) \\ & a_{31}(D)x(t) + a_{32}(D)y(t) + a_{33}(D)z(t) = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.37)$$

де $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ – відповідно координати: координата керування, координата чутливо-підсилювального елемента і виконавчого елемента.

Визначимо, як і раніше, умови при яких координата керування $x(t)$ буде інваріантною відносно до збурювання $f(t)$. Використав правило Крамера для системи (2.37) щодо параметра $x(t)$, одержимо:

$$\begin{array}{ccc}
 b_1 f(t) & a_{12} & a_{13} \\
 b_2 f(t) & a_{22} & a_{23} \\
 0 & a_{32} & a_{33}
 \end{array} = \frac{\begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} b_1 - \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} b_2}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}} \cdot f(t). \quad (2.38)$$

З аналізу виразу (2.38) видно, для того щоб $x(t)$ не залежала від $f(t)$ необхідно виконати тотожність:

$$\begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} b_1 - \begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} b_2 \equiv 0$$

звідси

$$b_2 = \frac{\begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{12} & a_{13} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}} b_1. \quad (2.39)$$

Вираження (2.39) є математичною умовою інваріантності будь-яких лінійних систем керування, що працюють по комбінованому принципу.

Одним з найважливіших питань теорії інваріантності є питання реалізації отриманих умов. Для систем керування критерій фізичної реалізації сформульований у такий спосіб: «Необхідною (але недостатньою) ознакою можливості застосування умов інваріантності при розрахунках різних динамічних систем є обов'язкова наявність у схемі, щонайменше, двох каналів впливу між точками додатка сили, що збурює, і виміру величини, що цікавить нас» [95]. Сформульований критерій одержав назву «принципу двоканальності». У роботі [43] показано, що якщо у системі керування, описуваною наступної спільною системою рівнянь:

$$\begin{array}{cccc}
 a_{11}(D)x_1 + a_{12}(D)x_2 + \dots + a_{1j}(D)x_j + \dots + a_{1n}(D)x_n = F_i(t) & & & \\
 a_{21}(D)x_1 + a_{22}(D)x_2 + \dots + a_{2j}(D)x_j + \dots + a_{2n}(D)x_n = F_i(t) & & & \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 a_{i1}(D)x_1 + a_{i2}(D)x_2 + \dots + a_{ij}(D)x_j + \dots + a_{in}(D)x_n = F_i(t) & & & \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 a_{n1}(D)x_1 + a_{n2}(D)x_2 + \dots + a_{nj}(D)x_j + \dots + a_{nn}(D)x_n = F_i(t) & & &
 \end{array} \quad (2.40)$$

удалося реалізувати умови абсолютної інваріантності, наприклад, для координати $x_j(t)$ щодо зовнішнього впливу, що збудує, $F_i(t)$, те при відсутності інших зовнішніх впливів, що збудують і при нульових умовах, ця змінна буде тотожним нулем $x_j(t) = 0$. У цьому випадку не можуть віддаватися які б то ні було впливи з боку координати $x_j(t)$ на інші координати, незважаючи на наявність фізичних зв'язків між усіма координатами.

У математичній формі ці впливи координати $x_j(t)$ на інші координати відображаються членами $a_{ij}(D)x_j$ при $i \neq j$. Члени ж $a_{ij}(D)x_j$ при $i = j$ характеризують динамічні властивості ізольоване взятого елемента системи. Тоді, при виконанні умов інваріантності для координати x_1 ($j=1$) і застережених умовах, усі члени $a_{ij}(D)x_j \equiv 0$ при фіксованому j для $i \neq j$, що еквівалентно розмиканню системи на виході елемента, обумовленого координатою x_j . Система рівнянь (2.40) для цього розімкнутого стану ухвалює вид:

$$\left. \begin{array}{l} a_{11}(D)x_1 + a_{12}(D)x_2 + \dots + a_{1n}(D)x_n = F_1(t) \\ 0 + a_{22}(D)x_2 + \dots + a_{2n}(D)x_n = F_2(t) \\ \dots \quad \quad \quad \dots \quad \quad \quad \dots \\ 0 + a_{i2}(D)x_2 + \dots + a_{in}(D)x_n = F_i(t) \\ \dots \quad \quad \quad \dots \quad \quad \quad \dots \\ 0 + a_{n2}(D)x_2 + \dots + a_{nn}(D)x_n = F_n(t) \end{array} \right\}. \quad (2.41)$$

Умову фізичної здійсненності абсолютно інваріантної системи можна сформулювати [43] так: розв'язок системи керувань (2.40), що описують поведінку деякої замкненої динамічної системи при виконанні умов абсолютної інваріантності для координати $x_j(t)$ щодо збудування $F_i(t)$ і розв'язок рівнянь (2.41), що описують поведінку цієї ж системи з розімкнутим на виході елементом, обумовленим координатою x_j , повинні бути однаковими при відсутності всіх інших зовнішніх збудувань, крім $F_i(t)$ і при «нульових початкових умовах». Природно, що при цьому компонента розв'язку $x_j(t)$ буде дорівнює нулю, як у замкненому, так і у розімкнутому стані системи. У результаті доходимо висновку [96], що необхідною умовою (але недостатньою) для можливості фізичної реалізації абсолютно

інваріантної системи є вимога нерівності нулю головного визначника системи керувань (2.41) у розімкнутому стані $\Delta_{\text{раз}} \neq 0$.

Критерій можливості фізичної реалізації, сформульований для лінійних систем, як показано у роботах [98, 111, 132], застосуємо і до нелінійних систем при виконанні ще однієї достатньої умови, що полягає у введенні у систему керування нелінійності, що компенсує. Принцип інваріантності при коректній постановці дозволяє добитися незалежності регульованого параметра від діючого збурювання тільки з точністю до вільної складової руху при нульових початкових умовах. Вільна (перехідна) складова руху при ненульових початкових умовах зберігається. Тому з'являється необхідність зведення до мінімуму помилки за вільним рухом системи. Це завдання як у лінійних, так і нелінійних системах може вирішуватися одними методами, тому що після реалізації у нелінійній системі керування умов інваріантності, остання, з погляду процесів, що протікають у ній, близька до лінійної й для її дослідження застосуємо лінійний математичний апарат.

Найбільш прийнятним методом мінімізації вільної складової руху є метод динамічного програмування Р. Беллмана [134] у формі А. М. Лєтова [144], що дозволяє розв'язати не тільки завдання оптимізації, але й завдання стійкості оптимальної системи. Постановка завдання може бути сформульована у такий спосіб. Є незмінна частина системи керування, що полягає тільки з функціонально необхідних елементів. Потрібно визначити структуру і параметри системи керування, що задовольняє прийнятому критерію оптимальності.

З висуванням ідеї аналітичного конструювання регуляторів [141, 142] вибору критеріїв оптимальності науковці, що створюють концепції побудови автостернових морських суден, почали приділяти особливій увагу. Пропонується вибирати такі критерії оптимальності руху судна, які відбивали б найкращі (у певному змісті) умови реального функціонування систем і у той же час були простими для аналітичного розв'язку завдання.

Як критерій оптимальності оберемо інтегральну оцінку якості:

$$I = \int_0^{\infty} V dt, \quad (2.42)$$

де $V = \dot{x}^2 + mS^2$, m – позитивне постійне число, що вказує «вагу» керування у загальній інтегральній оцінці якості; S – шукане керування.

Завдання у цьому випадку вирішується як лінійне. Причому, якщо незмінна частина системи щодо регульованої величини описується рівнянням високого порядку, те його необхідно привести до нормальної (стандартної форми) системи рівнянь першого порядку. На першому етапі математичну модель системи керування приводимо до виду:

$$F(x^{(n)}, x^{(n-1)}, \dots, x, S) = 0. \quad (2.43)$$

Для вистави рівняння (2.43) у нормальній формі, його необхідно вирішити щодо старшої похідної:

$$\frac{d^n x}{dt^n} = f(x^{(n-1)}, x^{(n-2)}, \dots, x, S) \quad (2.44)$$

і рівняння (2.44) можна привести до нормальної системи рівнянь. Для цього позначимо регульовану величину через x_1 і, ухвалюючи $\dot{x}_1, \ddot{x}_1, \dots, x_1^{(n-1)}$, за нові невідомі функції, поклавши $\dot{x} = x_2, \ddot{x} = x_3, \dots, x^{(n-1)} = x_n$. Враховуючи (2.44) можна записати нормальну диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} dx_n / dt &= b_{1n}x_n + b_{1n-1}x_{n-1} + \dots + b_{11}x_1 + b_{10}x + c_i S \\ dx_{n-1} / dt &= x_n \\ dx / dt &= x_1 \end{aligned} \right\},$$

де c_i, b_{ij} – деякі коефіцієнти, що залежать від параметрів системи керування.

Відповідно до ідеї аналітичного конструювання регуляторів [147] запишемо рівняння динамічного програмування:

$$\left. \begin{aligned} x^2 + ms^2 + (b_{1n}x_n + b_{1n-1}x_{n-1} + \dots + b_{11}x_1 + b_{10}x + c_i S) \frac{\partial \Psi}{\partial x_n} + \\ + x_n \frac{\partial \Psi}{\partial x_{n-1}} + \dots + \frac{\partial \Psi}{\partial x} = 0 \\ 2mS + c_i \frac{\partial \Psi}{\partial x_n} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

де Ψ – функція, що характеризує мінімум функціоналу по змінній S , що і є функцією початкового стану системи при $t = 0$. Причому функція Ψ , що входить у (2.45), є функцією Ляпунова, а функція V , що входить у критерій оптимальності (2.42), її повної похідній, тобто

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -V.$$

Тому завдання стійкості синтезованої оптимальної системи керування вирішується автоматично. Виключивши у системі (2.45) керування S , отримуємо рівняння для визначення допоміжної функції Ψ у вигляді:

$$x_2 + (b_{1n}x_n + b_{1n-1}x_{n-1} + \dots + b_{11}x_1 + b_{10}x) \frac{\partial \Psi}{\partial x_n} + \dots + x_1 \frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{C_1^2}{4m} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x_n} \right)^2 \quad (2.46)$$

Розв'язок нелінійного рівняння (2.46) шукається у вигляді квадратичної форми координат:

$$\Psi = \sum_i \sum_j A_{ij} x_i x_j, \quad i, j \in \overline{1, n}. \quad (2.47)$$

Керування S у явному виді може бути визначене із другого рівняння системи (2.45)

$$S = -\frac{C_i}{2m} \frac{\partial \Psi}{\partial x_n} \quad \text{или} \quad S = \sum_{i=1}^n P_i x_i, \quad (2.48)$$

де P_i – деякі постійні коефіцієнти, складені із A_{ij} коефіцієнтів. Останні можуть бути визначені, якщо підставити (2.47) у (2.46) і дорівняти коефіцієнти при відповідних змінних x_j і x_i . При визначенні коефіцієнтів A_{ij} доводиться вирішувати громіздкі системи нелінійних алгебраїчних рівнянь. Як видно з (2.48), у випадку застосування, як критеріїв оптимальності, квадратичної оцінки якості процесу регулювання, керування S виходить лінійним. Слід зазначити, що сказане буде слушним лише при невеликих відхиленнях координат від значення, що встановилося.

При розробці реальних систем керування рухом АПА дуже важливим є можливість застосування і визначення послідовності операцій (алгоритмізація) обраного теоретичного методу. Наприклад, при синтезі

регуляторів координат електрорушіїв АПА пропонується використовувати оптимізацію локальних систем керування на основі принципів підпорядкованого регулювання координат: «технічний оптимум» (*Beitrag Optimum*) і «симетричний оптимум».

2.3 Алгоритмізація процесів синтезу систем керування рухом АПА

Аналіз наведених загальних методів синтезу систем керування рухом АПА з погляду їх алгоритмізації (методологічного забезпечення) приводить до наступної послідовності операцій.

1. Вибирається вихідна структура й записується математична модель синтезованої системи керування електрорушійями, що складена із мінімуму функціонально необхідних елементів.

2. Відповідно до методу одержання умов інваріантності у диференціальній формі записується α -система, яка відрізняється від вихідної математичної моделі введеними у керування чутливо-підсилювальними елементами, підлягаючими визначенню функціями й параметрами α_j , що знаходяться після збурювань.

3. Після диференціювання α -системи за параметрами α_j , та після обліку критерію інваріантності $\frac{\partial x_i}{\partial \alpha_j} \equiv 0; i, j \in \overline{1, n}$, записують основну система рівнянь. Застосувавши до основної системи рівнянь диференціальні оператори, виходять умови інваріантності у диференціальній формі.

4. Виходячи з вимоги рівності порядків лівої й правої частини, отриманих у диференціальній формі умов інваріантності, визначаються порядки всіх операторів, що входять у ці умови. Причому, оператори вихідної математичної моделі вважаються заданими і однозначними.

5. 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,

уведених для α -системи. Визначаються умови інваріантності у явному виді шляхом розв'язку отриманої системи рівнянь у часткових похідних. Умови інваріантності нелінійних систем залежать від початкових умов, однак практично це важко врахувати при синтезі системи керування, тому, попередньо, початкові умови покладаються рівними нулю.

6. Отримуємо математичну модель синтезованої інваріантної системи керування шляхом введення в явному виді умов інваріантності в α - систему. Слід помітити, що звичайно умови інваріантності вимагають введення в синтезовану систему нелінійності, що компенсує і є зворотною функцією наявної у вихідній системі нелінійності. Система в цьому випадку, з погляду процесів, що притікають у ній, стає лінійною. Це дає можливість розглядати надалі систему керування рухом АПА як лінійну. У зв'язку із цим, якщо на систему діє кілька збурювань, те досить одержати умову інваріантності щодо одного головного збурювання, а потім – щодо інших збурювань одержувати їх як для лінійної системи (за аналогією).

7. Записується система рівнянь, що описує вільний рух інваріантної системи керування електрорушійними, яка виходить із математичної моделі інваріантної системи шляхом взаємного виключення нелінійностей і прирівнювання до нуля правої частини рівнянь.

8. В отриману систему рівнянь вводяться керування, які потрібні визначити (наприклад, за допомогою методу динамічного програмування, чи іншим чином), після чого система рівнянь приводиться до нормальної форми.

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

10. Відповідно до методу синтезу замкненого контуру регулювання записуються рівняння динамічного програмування, з яких визначаються керування в загальному виді. На підставі рівнянь динамічного програмування записується рівняння в часткових похідних для визначення допоміжної функції, що входить у вираження керувань. Розв'язок цього рівняння є у вигляді симетричної квадратичної форми.

11. Підставивши значення похідних допоміжних функцій по відповідних координатах у рівняння для допоміжної функції й дорівнюючи коефіцієнти при однакових змінних, одержуємо систему алгебраїчних рівнянь для визначення коефіцієнтів квадратичної форми. Розв'язок цієї системи рівнянь щодо коефіцієнтів квадратичної форми виконується за допомогою ПЕОМ. Причому, беруться тільки позитивні значення коефіцієнтів, і цим автоматично вирішується питання стійкості системи.

12. Використовуючи вираження похідних допоміжної функції по відповідних координатах і певні коефіцієнти квадратичної форми, записуються умови оптимальності в явному виді.

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

2.4 Математичний опис вирішення поставленої проблеми підвищення ефективності експлуатації ЕРК багатоцільових 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:

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

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 електрорушіїв 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 різномірними вхідними даними; C_7 – перевірка розроблених методів шляхом експерименту та імітаційного моделювання; p_1 – умови відповідності мети проблеми; 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.

На рис. 2.5–2.10 наведено функціонально-структурні схеми, що описують методологічну побудову дослідження.

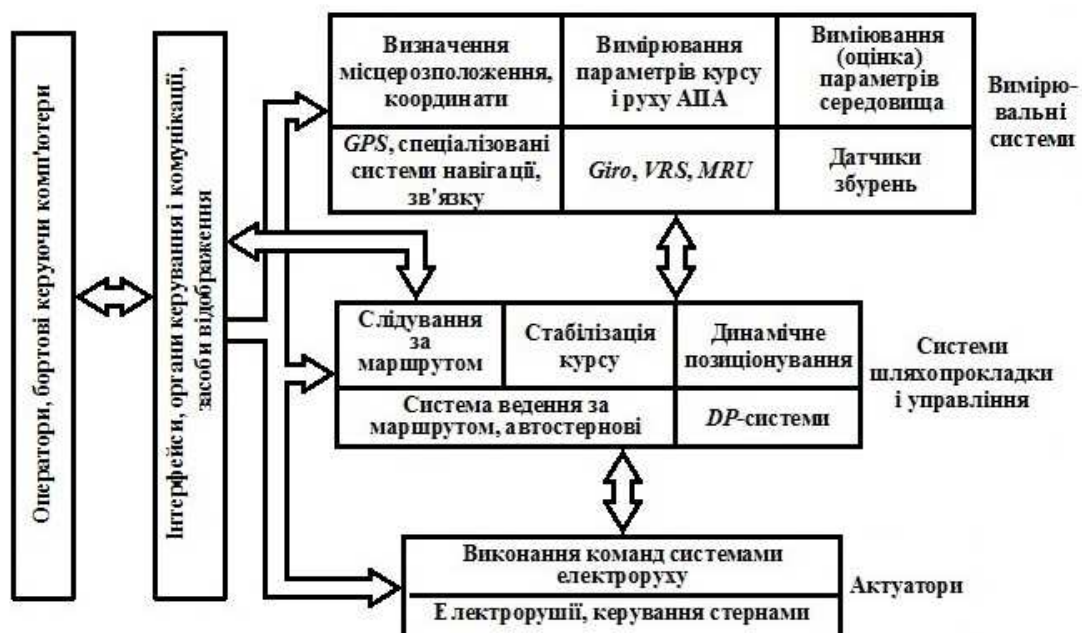


Рисунок 2.5 – Керуючі та інформаційні системи багатоцільових АПА

ЗАГАЛЬНІ						
		ДЛЯ КОГО? (СПОЖИВАЧ)	ЩО? (ПРОДУКЦІЯ, ТОВАР)	ЯКЕ? (ЯКІСТЬ, ТТХ)	СКІЛЬКИ? (ОБ'ЄМ, КІЛЬКІСТЬ)	КОЛИ? (СТРОКИ)
		1	2	3	4	5
Ч А С Т К О В І	ДЛЯ КОГО? (СПОЖИВАЧ)	1. МЕТА	2.1. Ціна – якість – сервісне обслуговування, ТО	3.1. Індивідуалізація, тюнінг, конверсія, реновація	4.1. Одиначна постача / серія	5.1. Системи логістики й розподілу ресурсів ("точно у строк")
	ЩО? (ПРОДУКЦІЯ, ТОВАР)	1.1. Відповідність запиту практики, потребам флотів, політичним обставинам	2. МІСІЯ	3.2. Забрана якість, системи якості (ISO 9000)	4.2. Програма виробництва, продуктивність	5.2. Строки постачання
	ЯКЕ? (ЯКІСТЬ, ТТХ)	1.2. Споживачі, маркетинг	2.2. Рівень конкурентоспроможності, ринкова позиція	3. СТРАТЕГІЯ	4.3. Асортимент обладнання, оснащення, озброєння	5.3. Можливості модернізації / реновації / конверсії / змін, глибина можливих перетворень
	СКІЛЬКИ? (ОБ'ЄМ, КІЛЬКІСТЬ)	1.3. Об'єми фінансування, Плато спроектованого попиту	2.3. Об'єми проекту, виробництва	3.3. Складність / кооперація / постачі	4. ТАКТИКА	5.4. Розміри партій під час постачі
	КОЛИ? (СТРОКИ)	1.4. Строки виробництва, споживання, життєвий цикл	2.4. Строки: проектування / здачі / виходу на ринок	3.4. Інноваційне випередження конкурентів	4.4. Логістика проектування, виробництва, розподілу ресурсів	5. ОПЕРАТИВНЕ УПРАВЛІННЯ (ЕКСПЛУАТАЦІЯ)

Рисунок 2.6 – Місія синтезу електрорушіїв багатоцільових АПА з урахуванням запитів практики

НЕПРОТЕРИЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМ ЕРК БАГАТОЦІЛЬОВИХ АПА			
ВИМОГИ ТА ОБМЕЖЕННЯ:			
- універсальність, можливості реконфігурації, прийомісткість, стабілізація режимів, безпека, мала осадка і ін. - фінансові, політичні, виробничі, патентні, технологічні, інформаційні, кадрові, часові			
ВІД ЗАГАЛЬНОГО ДО ЧАСТКОВОГО			
ВІД ТЕОРІЇ ДО ПРАКТИКИ	ВІДБІР: - АПА-прототипів, аналогів; - і визначення можливостей суднобудівників; - інформації про проведення морських, у тому числі спеціальних, операцій	БАГАТОЦІЛЬОВИХ Пошукові дослідження. Евристика та практика. Синтез конструкцій, СППР, оптимізація окремих рішень. Попереднє оцінювання	Аналіз якості й відбір варіантів (проектних організацій/тендерної пропозиції, проекту, постачальників, виробників). Випробування, експерименти, фізичне моделювання
	АНАЛІЗ І ВІДБІР (УТОЧНЕННЯ): - відомих рішень, прототипів, аналогів; - систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень; - досвіду управління АПА і проведення морських спецоперацій	Евристична й чисельна оптимізація та синтез ЕРК. Моделювання.	Аналіз якості запропонованих проектних рішень (моделювання, експертні методи тощо)
	ДОСВІД ПРОЕКТУВАННЯ, СИНТЕЗУ МОРСЬКОЇ І СПЕЦІАЛЬНОЇ ПРАКТИКИ: - експлуатації, управління, постачання, логістики, підтримки і т.і. - врахування можливостей і обмеження	Оцінювання основних властивостей. Оцінювання потужності, швидкодії, енергоспоживання і т.і.	Відбір постачальників, проектувальників (тендерні процедури)
	КОНЦЕПТУАЛЬНІ РІШЕННЯ: - технологічні, техніко-експлуатаційні, конструктивні; - розробка загальної концепції; - побудова загальної архітектури й відбір основних елементів електрорушіїв та їх систем управління	Оцінювання/уточнення основних ТТХ, параметрів, елементів конструкції, типу електрорушіїв, систем управління, основного обладнання, навігації, живлення і т.і.	Супровід: проектування, закупівель, виробництва, випробувань. Планування експерименту й обробка експериментальних даних. Комплексний аналіз якостей судна, нових проектних рішень, спеціальних властивостей і функцій

Рисунок 2.7 – Непротеричне проектування та синтез систем ЕРК багатоцільових АПА

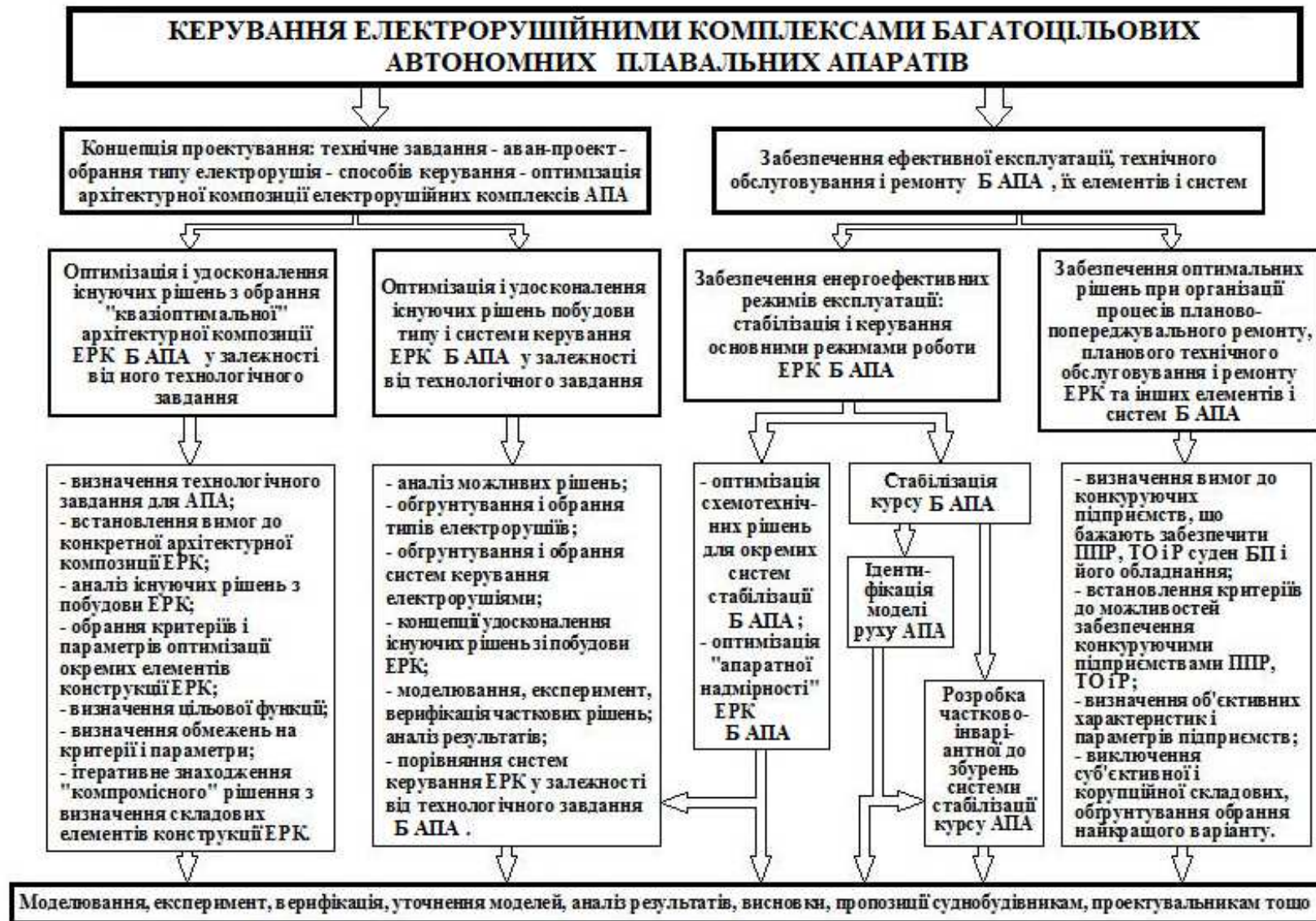


Рисунок 2.8 – Керування електрорушіяними комплексами багатocільових АПА

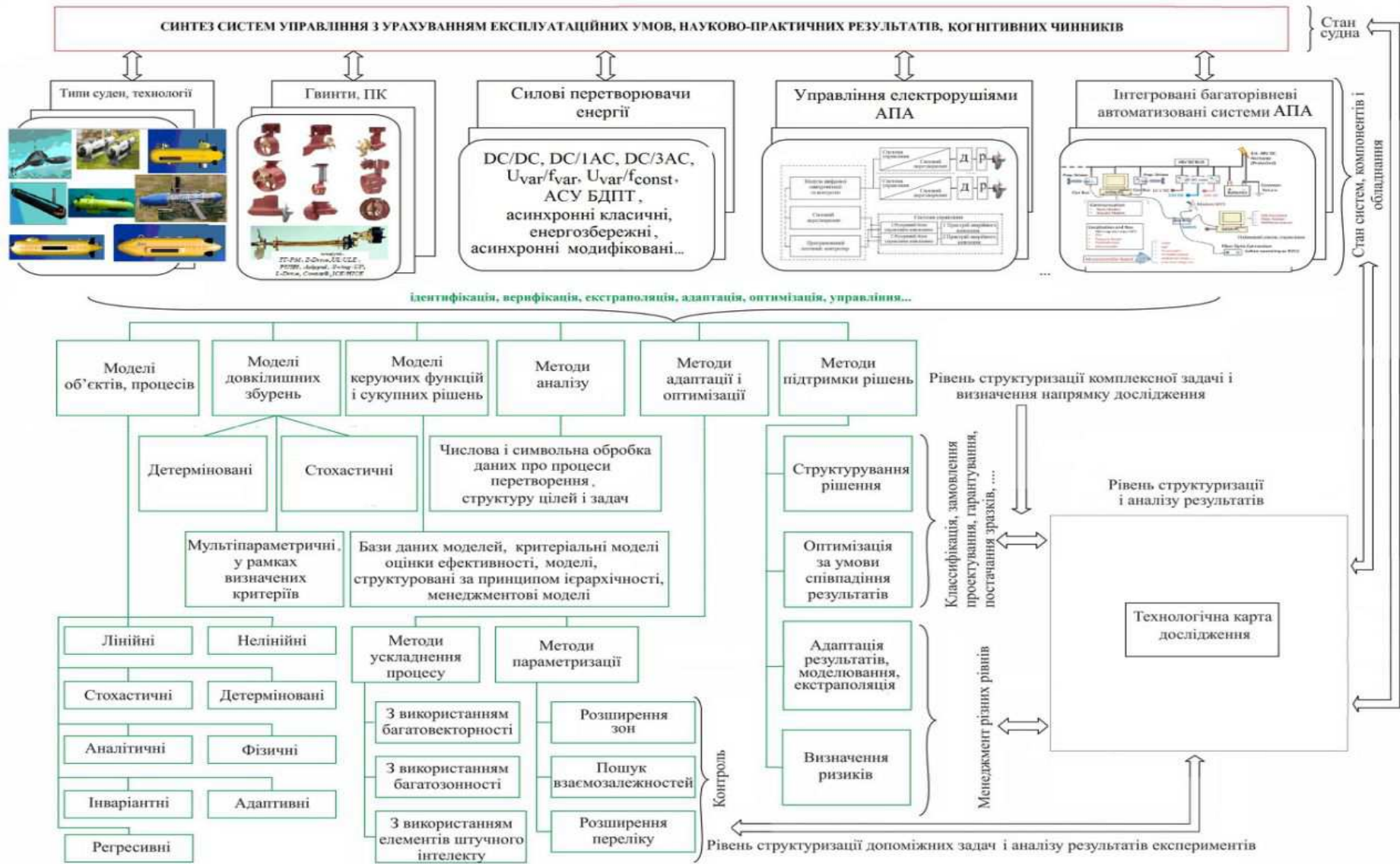


Рисунок 2.9 – Синтез систем керування багатоцільовими АПА

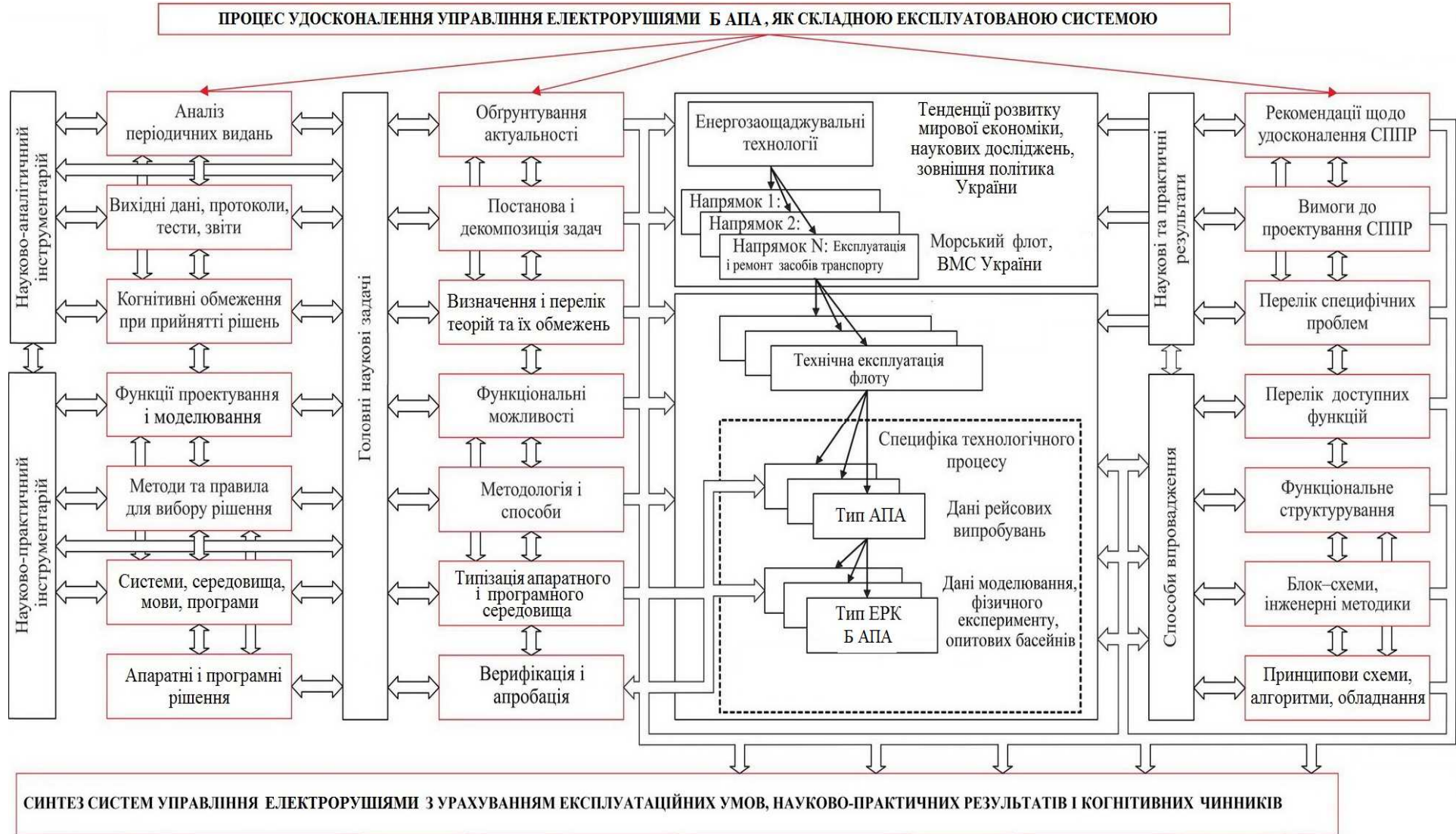


Рисунок 2.10 – Процес удосконалення керування електрорушіями багатоцільових АПА, як складною експлуатованою системою

2.5 Висновки до розділу 2

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 s 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».

Наведено функціонально-структурні схеми, що описують методологічну побудову дослідження.

Основні наукові результати розділу опубліковані у [41, 42].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАРШОВИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОРУХУ БАГАТОЦІЛЬОВИХ АПА

3.1 Визначення енергоефективних режимів роботи маршового електродвигуна автономного плавального апарата

3.1.1. Аналіз можливостей морських транспортних систем електроруху і тенденції їх розвитку

Відомо, що для малих АПА з відстанню дії до 10 км апаратів основним є режим крейсерської швидкості. Це така швидкість руху, при якій досягається максимум відносини $\frac{\text{Пройдений шлях}}{\text{Витрати палива (енергії)}}$, тобто апарат без підзарядки (дозаправки) при цьому зможе подолати максимально можливу відстань.

Стислий аналіз існуючих систем електроруху і тенденції їх розвитку наведені у [35, 60, 64, 239]. У цих роботах показано, що на сьогоднішній день немає усталеної думки і загальних принципів обрання типів електродвигунів і їх систем керування. Наприклад, сучасні електрорушійні системи малих АПА надводно/підводного типу будуються на основі баророзвантажених [31, 32, 215] асинхронних електродвигунів (АД) з електронною системою керування [64, 88, 216]. Однак особливостям режимів енергозбереження приділено дуже мало уваги. У багатьох дослідженнях показано, що з боку маршового гвинта [76, 92] йде основне навантаження двигуна пропульсивного комплексу [57, 153], і вкрай рідко враховується той факт, що статичний навантажувальний момент M_c близький за описом до «вентиляторного» [54, 136, 211]. У першому наближенні цей момент пропорційний другому ступеню частоти обертання ω гвинта:

$$M_c = k_1(\omega + k_2)^2, \quad (3.1)$$

де k_1 і k_2 – коефіцієнти, що залежать від параметрів гвинта (кроку, діаметру та інших), особливостей конструкції пропульсивного комплексу [57, 136], режиму

плавання, рівня занурення гвинта.

З аналізу відомих рішень [3, 55, 68, 131, 138] можна встановити, що досить ефективним є застосування частотних способів керування асинхронними і синхронними двигунами електрорушіїв. Наприклад, у роботах [3, 68, 69, 131, 256], описано багато переваг частотних векторних і скалярних способів керування. Однак вартість таких систем для АПА, що виконують задачі брандерів, знищувачів мін та аналогічні [71, 250, 252], виявляється неприпустимо високою. Навіть при невеликому зниженні швидкості руху АПА суттєво знижується статичний момент опору і маршовий АД працює з частковим навантаженням. Крім того, гвинт, у залежності від умов рухів АПА, може бути занурений у воду не повністю. Все це призводить до складних змін характеру навантаження на маршовий АД апарата. Зазначені особливості функціонування пропульсивного комплексу дозволяють у системі електроруху АПА використовувати відомі алгоритми керування маршовим АД шляхом зміни напруги живлення при незмінній її частоті. Але для малих АПА, що виконують «одноразові» завдання [56, 71, 252] з маршовим АД і перетворювачем напруги, вкрай важливо наступне. Це, по-перше, підтримка енергоефективних (енергозберігаючих) [89, 123, 257] режимів роботи і, по-друге, їх автоматичне встановлення. При визначенні часу автономної роботи апарата, названі чинники – вирішальні.

З попередньо проведеного аналізу інформаційних джерел встановлено, що енергозберігаючі режими і алгоритми роботи для малопотужних систем електроруху АПА у даний час недостатньо досліджені. Наприклад, у відомих публікаціях не показано, наскільки можуть бути зменшені сумарні втрати для маршових АД малої потужності (до 250 Вт), немає оцінок умов досягнення мінімуму втрат потужності, не показано, чи можливе досягнення і стабілізація мінімальних значень струму, максимуму ККД, коефіцієнта потужності. Також незрозумілі функціональні залежності впливу поточного ковзання, типу застосованої у АД сталі, способу охолодження, стану підшипникових вузлів і т. д. на сумарні втрати АД, у тому числі – баророзвантаженого. Саме ці проблеми і невирішені задачі підлягають ретельному розгляду.

3.1.2. Особливості роботи маршових АД у зоні часткових навантажень

При роботі маршових АД у зоні часткових навантажень (менших 60 % номінальних значень), що характерно для систем електроруку АПА, знижується їх результуюча енергетична ефективність [64, 93, 153]. Це можна проілюструвати на прикладі баророзвантаженого [31] маршового АД потужністю 180 Вт. Номінальні параметри АД наступні: напруга $U_{\text{НОМ}} = 220\text{В}$, $\eta_{\text{НОМ}} = 0,66$, $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,76$, $P_{\text{НОМ}} = 180\text{Вт}$, $\omega_{\text{НОМ}} = 288,9\text{ рад/с}$, $I_{\text{НОМ}} = 0,54\text{А}$. Параметри схеми заміщення трифазного АД ідентифіковані окремим чином. Для цього двигуна, за допомогою стенду [201], експериментально отримані характеристики навантажень (рис. 3.1), де явно виражено їх нелінійний спадаючий характер. Характеристики на рис. 3.1 наведені у функції відносного статичного моменту $M_c^* = M_c / M_{c_{\text{НОМ}}}$, де $M_{c_{\text{НОМ}}}$ – номінальний статичний момент.

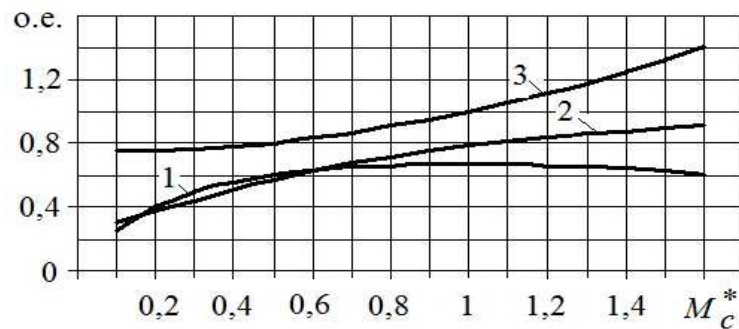


Рисунок 3.1 – Характеристики баророзвантаженого АД в функції навантаження:

1 – ККД; 2 – $\cos\varphi$; 3 – $I_1 / I_{\text{НОМ}}$

З аналізу літературних джерел і характеристик баророзвантаженого АД припустимо, що при зниженні навантаження M_c існує такий магнітний потік маршового АД, коли сумарні втрати потужності зменшаться.

Саме для цього припущення проведемо оцінки можливостей зменшення втрат потужності у системі електроруку АПА.

3.2 Оцінка можливостей зниження втрат потужності при роботі маршового трифазного АД у системі електроруху АПА

У цій системі (див. рис. 1.12 і 1.13) застосований трифазний баророзвантажений АД з короткозамкненим ротором. Аналіз проводимо при менших номінального значення (до $0,1M_{с_{ном}}$) середніх статичних навантаженнях з боку маршового гвинта. Сумарна ΔP_{Σ} потужність втрат енергії у такому АД визначається сумою постійних $\Delta P_{=}$ і змінних ΔP_{\approx} втрат потужності:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{=} + \Delta P_{\approx}. \quad (3.2)$$

Постійні втрати потужності $\Delta P_{=}$ складаються з втрат у сталі $\Delta P_{ст}$ статора і ротора, механічних втрат $\Delta P_{мех}$ і втрат на збудження $\Delta P_{зб}$:

$$\Delta P_{=} = \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{зб}. \quad (3.3)$$

Втрати у сталі від вихрових струмів і гістерезису залежать від частоти f джерела живлення, другого ступеня амплітуди індукції B і функції $f_1(s, k)$ ковзання s :

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст_{ном}} \left(\frac{f}{f_{ном}}\right)^k \left(\frac{B}{B_{ном}}\right)^2 f_1(s, k), \quad (3.4)$$

де $f_1(s, k) = (1 + s^k)$, а k – показник ступеня, що залежить від марки застосованої електротехнічної сталі.

З огляду на те, що $\left(\frac{B}{B_{ном}}\right)^2 \approx \left(\frac{\Psi}{\Psi_{ном}}\right)^2$ можна записати

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст_{ном}} \left(\frac{f}{f_{ном}}\right)^k \left(\frac{\Psi}{\Psi_{ном}}\right)^2 f_1(s, k), \quad (3.5)$$

де Ψ – основне потокозчеплення.

Для баророзвантаженого АД малого АПА встановимо максимально допустимі діапазони зміни відносного ковзання s і можливі значення зміни коефіцієнта k : $s \in (0,005 \dots 0,1)$ і $k \in (1,2 \dots 1,7)$.

Механічні втрати визначаються ковзанням ротора:

$$\Delta P_{мех} = \Delta P_{мех_{ном}} f_2(s, m), \quad (3.6)$$

де $\Delta P_{\text{мех}_{\text{НОМ}}} \approx (0,01 \dots 0,15) P_{2\text{НОМ}}$ – номінальні механічні втрати; $f_2(s, m) = (1 - s)^m$; m – показник ступеня, що залежить від стану підшипникових вузлів, способу охолодження та інших особливостей механічної частини АД.

Тут встановимо також максимально допустимі діапазони зміни відносного ковзання s і можливі значення зміни коефіцієнту m для баророзвантаженого АД. Приймаємо $s \in (0,005 \dots 0,1)$ і $m \in (1,1 \dots 1,5)$. Врахуємо, що для будь-якого АД, по-перше, коефіцієнт $k = \text{const}$, а m змінюється тільки при досить тривалому експлуатаційному періоді, і, по-друге, при зменшенні ковзання функція $f_1(s, k)$ зменшується, а $f_2(s, m)$ – зростає. Таким чином, слід вважати, що сумарна зміна потужності втрат від цих складових практично незмінна. При зазначених припущеннях можна прийняти такі середні значення функцій:

$$f_1(s, k) = k_{\text{ст}} = 1,03; \quad f_2(s, m) = k_{\text{мех}} = 0,92.$$

Надалі ці функції приймаємо постійними величинами при змінах ковзання від номінального до нульового значення.

Втрати у міді обмотки статора на збудження АД залежать від струму намагнічування, який створюється реактивною складовою I_m струму статора:

$$\Delta P_{\text{зб}} = 3I_m^2 R_1. \quad (3.7)$$

Змінні втрати ΔP_{\approx} складаються з втрат у обмотках статора і ротора, без урахування втрат на збудження, і пропорційні другому ступеню струму навантаження. При роботі при невеликих ковзаннях змінні втрати будуть визначатися виразом:

$$\Delta P_{\approx} = 3I_2'^2 (R_1 + R_2'). \quad (3.8)$$

Таким чином, вирази (3.2)–(3.8) є методологічною основою рішення поставленої задачі.

Введемо для основних параметрів АД електрорушії АПА відносні одиниці. Тоді для відповідних складових відносні втрати потужності:

$$\Delta p_{\approx} = \frac{\Delta P_{\approx}}{\Delta P_{\Sigma \text{мех}}}; \quad \Delta p_{=} = \frac{\Delta P_{=}}{\Delta P_{\Sigma \text{мех}}}; \quad \Delta p_{\text{ст}} = \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{\Delta P_{\Sigma \text{мех}}}; \quad (3.9)$$

$$\Delta p_{\text{мех}} = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{\Delta P_{\Sigma \text{НОМ}}}; \quad \Delta p_{\text{зб}} = \frac{\Delta P_{\text{зб}}}{\Delta P_{\Sigma \text{НОМ}}}; \quad \Delta p_{\Sigma \text{НОМ}} = \frac{\Delta P_{\text{НОМ}}}{\Delta P_{\Sigma \text{НОМ}}} = 1,$$

і $i_1^* = \frac{I_1}{I_{1\text{НОМ}}}$; $i_2^* = \frac{I_2'}{I_{2\text{НОМ}}}$; $i_{\text{зб}}^* = \frac{I_m}{I_{m\text{НОМ}}}$ – для струмів; $f^* = \frac{f}{f_{\text{НОМ}}}$ – для частоти джерела живлення; $\Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{НОМ}}}$ – для магнітного потоку

($\phi^* = \psi = \frac{\Psi}{\Psi_{\text{НОМ}}}$); $\omega^* = \frac{\omega}{\omega_0}$ – для кутової швидкості ротора; $M^* = \frac{M}{M_{\text{НОМ}}}$ – для моментів.

Зв'язок між струмом ротора і електромагнітним моментом пропорційний добутку магнітного потоку на активну складову струму ротора: $M = c\Phi I_2' \cos\phi_2$, де c – конструктивний коефіцієнт двигуна; ϕ_2 – кут зсуву між векторами струму ротора I_2' і ЕРС. При роботі у режимі малих ковзань приймаємо, що $\cos\phi_2 \approx 1$.

З урахуванням уведених відносних одиниць, взаємний зв'язок електромагнітного моменту, струму ротора і потоку у повітряному зазорі АД:

$$M^* = i_2^* \Phi^*. \quad (3.10)$$

Для попередньої оцінки можливого зниження втрат потужності при роботі з ослабленням магнітного потоку АД вважаємо, що робоча точка зміщується до початку координат по прямій. Іншими словами вважаємо, що струм збудження $i_{\text{зб}}^* = \Phi^*$. Таким чином, при роботі АПА на різних маршових швидкостях, і зі зменшеним статичним навантаженням, можна записати:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{\approx} + \Delta p_{=} = \Delta p_{\approx \text{НОМ}} i_2^{*2} + \Delta p_{\text{стНОМ}} f^{*k} \Phi^{*2} k_{\text{ст}} + \Delta p_{\text{мехНОМ}} k_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{збНОМ}} i_{\text{зб}}^{*2}. \quad (3.11)$$

При постійній частоті ($f^* = 1$) джерела електроживлення:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{\approx} + \Delta p_{=} = \Delta p_{\approx \text{НОМ}} \left(\frac{M^*}{\Phi^*}\right) + \Delta p_{\text{стНОМ}} \Phi^{*2} k_{\text{ст}} + \Delta p_{\text{мехНОМ}} k_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{збНОМ}} \Phi^{*2} \quad (3.12)$$

і для номінальних умов роботи АД $\Delta p_{\Sigma} = 1$.

Визначимо екстремум функції (3.12) відносно Φ , отриманий з умови $\partial(\Delta p_{\Sigma})/\partial\Phi^* = 0$. Екстремум визначить значення магнітного потоку, при якому

для сталого режиму роботи і навантаження, меншого за номінальне, сумарні втрати потужності будуть мінімальні:

$$\Phi_{\text{опт}}^* = k_{\text{н}} \sqrt{M^*}, \quad (3.13)$$

де $k_{\text{н}}$ – коефіцієнт номінальних втрат потужності прийнятий рівним

$$k_{\text{н}} = [\Delta p_{\approx \text{ном}} / (k_{\text{ст}} \Delta p_{\text{стном}} + \Delta p_{\text{збном}})]^{0,25}. \quad (3.14)$$

З урахуванням прийнятих припущень, вважаємо, що для статичного режиму роботи АПА відносно значення магнітного потоку, при якому сумарні втрати потужності АД мінімальні, прямо пропорційно добутку коефіцієнта номінальних втрат потужності на корінь квадратний з відносного статичного моменту. Різниця між значеннями втрат потужності при повному магнітному потоці з частковим навантаженням на АД і оптимальному магнітному потоці при такому же навантаженні, дає значення величини можливої збереженої потужності

$$\Delta p_{\text{збер}} = \Delta p_{\Sigma} \Big|_{\Phi^* = 1, M^* < 1} - \Delta p_{\Sigma} \Big|_{\Phi^* = \Phi_{\text{опт}}^*, M^* < 1},$$

звідки отримаємо

$$\Delta p_{\text{збер}} = \Delta p_{\approx \text{ном}} M^{*2} + \Delta p_{\text{стном}} k_{\text{ст}} + \Delta p_{\text{збном}} - 2M^* k_{\text{ном}}^2, \quad (3.15)$$

при $u_{\text{опт}}^* = k_{\text{ном}} \sqrt{M^*}$.

Аналітичний розрахунок миттєвих втрат енергії у нелінійної системі електроруху АПА з АД складний, так як вираження для амплітуди і частоти напруги включають векторні величини і комплексні опори, залежні від ковзання, потокозчеплення та інші змінні. Для подолання цих труднощів застосовано математичну модель [24] баророзвантаженого АД на валу якого розташований (через редуктор, або через муфту) маршовий гвинт АПА у системі координат $x - y - 0$. У модель введені (у функції напруги та частоти) нелінійні залежності магнітного потоку, втрати у сталі, статичне вентиляторне навантаження і розраховуються значення витрат енергії (миттєві і середні), ККД, $\cos \phi$, активна, реактивна і механічна потужність, значення струмів статора і ротора, ЕРС, потокозчеплення за координатами.

На рис. 3.2 показані розрахункові залежності ККД і струму статора для баророзвантаженого АД, сконструйованого на основі двигуна типу 4А56А2.

Залежності побудовані при зміні напруги і різних відносних $M_c^* = \frac{M_c}{M_{ном}}$ статичних навантажень з урахуванням нелінійності магнітної системи. Як видно з рис. 3.2, є явно виражені екстремуми ККД і струму статора.

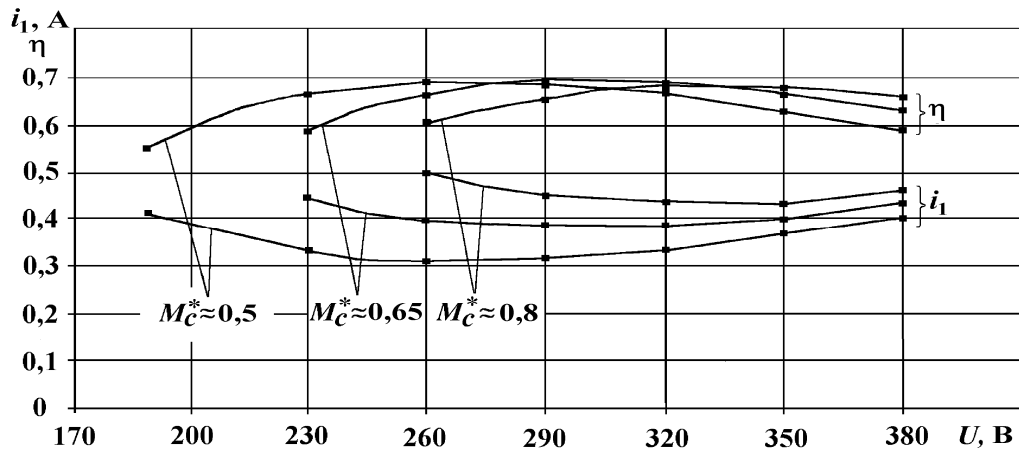


Рисунок 3.2 – Залежності ККД і струму статора при різних статичних навантаженнях для баророзвантаженого АД у функції напруги живлення

Так, при статичному навантаженні, що дорівнює $0,65M_{c_{ном}}$, мінімум струму відповідає напрузі 300 В і практично збігається з максимумом ККД, споживаний струм менше номінального на 8%, а ККД зріс майже на 5%.

3.2.1. Уточнення параметрів моделі трифазного АД системи електроруху АПА

Останні версії середовища *Matlab* (починаючи з 2015 року) не дозволяють розкрити внутрішню структуру вбудованих моделей АД, а вбудовані файли допомоги (*Help*) описують лише загальновідомі системи диференціальних рівнянь і схему заміщення АД. Саме цей факт не дозволяє вносити необхідні модифікації у математичні моделі (ММ) АД. Використання такого типу ММ АД призводить до помітних відмінностей розрахункових динамічних і статичних характеристик АД від реальних. Так, для АД серії 4А втрати в сталі від вихрових струмів і гістерезису складають до 20% сумарних

номінальних втрат і до 50% від повних втрат холостого ходу. І, наприклад, при роботі АД з частковим завантаженням, що характерно при оптимізації режимів роботи систем електроруху АПА, відсутність у ММ обліку втрат у стали призводить до суттєвих похибок при оцінці енергетичних характеристик АД і властивостей системи електроруху АПА у цілому. Облік і окремо кожного з перелічених ефектів, і спільного їх впливу дуже ускладнений і є предметом спеціальних досліджень фахівців в області проектування електричних машин. Потрібно відзначити, що однією з особливостей математичної моделі АД системи електроруху АПА є те, що у ній немає необхідності враховувати зміни опорів статора і ротора при змінах температури. Це пов'язано з тим, що АД АПА баророзвантажений, постійно охолоджується практично до температури навколишнього середовища – морської води (максимальна розрахункова температура охолоджуючої середовища для Чорного і Азовського морів становить $+25^{\circ}\text{C}$) [166].

Також підкреслимо, що при розробці ММ АД дуже ускладнені проблеми ідентифікації параметрів АД (оцінкою залежностей параметрів АД від струмів, потокозчеплення, частоти струмів статора і ротора), що є предметом багатьох спеціальних досліджень. Більшість ММ АД або враховують лише частину названих ефектів, або настільки складні, що не підходять для комплексного рішення задач аналізу та синтезу автоматизованих систем керування, наприклад, при дослідженнях спільної роботи АД з перетворювачами частоти або регуляторами напруги на статорі.

Параметри, що входять до ММ АД зазвичай визначаються з Т-подібної схеми заміщення (СЗ) або зі спрощеної, Г-образної (див. рис. 3.3) [37, 63, 166], де R_1 , R_m і R_2' – відповідно, активний опір фази статора, гілки намагнічування і активний, наведений до статора, опір ротора; $X_{1\sigma}$, $R_{2\sigma}'$ і X_m – відповідно, індуктивні опори розсіювання фаз статора, ротора та індуктивний опір гілки намагнічування (на рис. 3.3, б позначено $Z_m = R_m + jX_m$ і $Z_1 = R_1 + jX_{1\sigma}$).

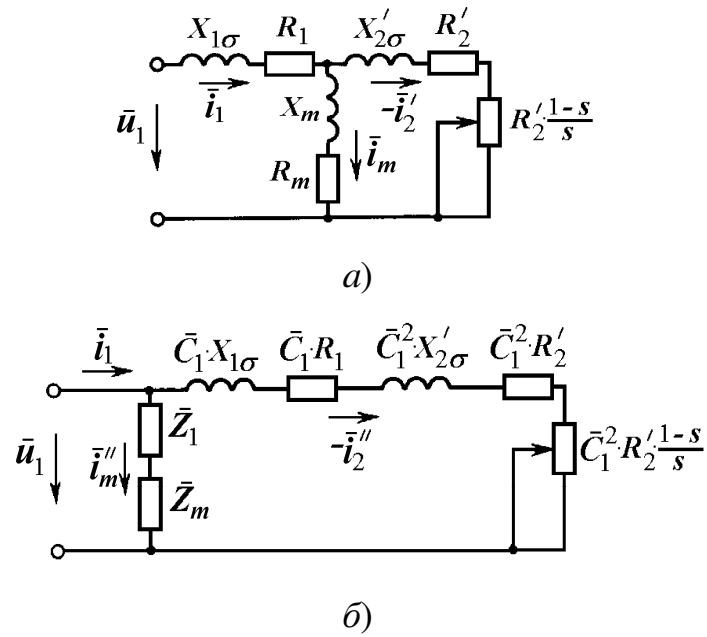


Рисунок 3.3 – Схеми заміщення АД: Т-подібна (а); Г-подібна (б)

Векторна діаграма, відповідна рис. 3.3, а, наведена на рис. 3.4, де, для зручності читання, зміщені дійсні масштабні співвідношення між модулями напруг, струмів і кутами між ними.

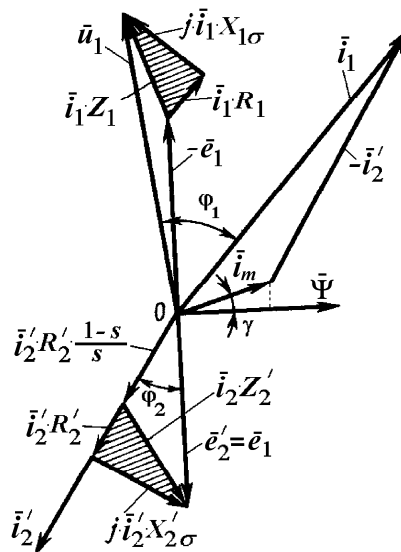


Рисунок 3.4 – Векторна діаграма для Т-подібної схеми заміщення фази АД

У фундаментальних працях [20, 72, 73, 152] показано, що при розробці систем керування АД для діапазонів D регулювання швидкостей до 20, змінами ряду параметрів можна знехтувати.

Наприклад, на рис. 3.5, наведені графіки, що ілюструють зміни основних параметрів АД при різних режимах його роботи. Очевидно, що змінами

індуктивностей розсіювання $L_{1\sigma}$ і $L_{2\sigma}$ у функції струму I_1 статора ($L_{1\sigma}(I_1)$ і $L_{2\sigma}(I_1)$), (див. рис. 3.5, в) і залежністю зміни індуктивності розсіювання $L_{2\sigma}(\omega_2)$ (див. рис. 3.5, б) від частоти ω_2 струму ротора можна знехтувати, тоді як зміни індуктивності головною магнітного ланцюга $L_m(\psi)$ від потокозчеплення ψ і опору ротора $R'_2(\omega_2)$ досить суттєві (див. рис. 3.5, а і б).

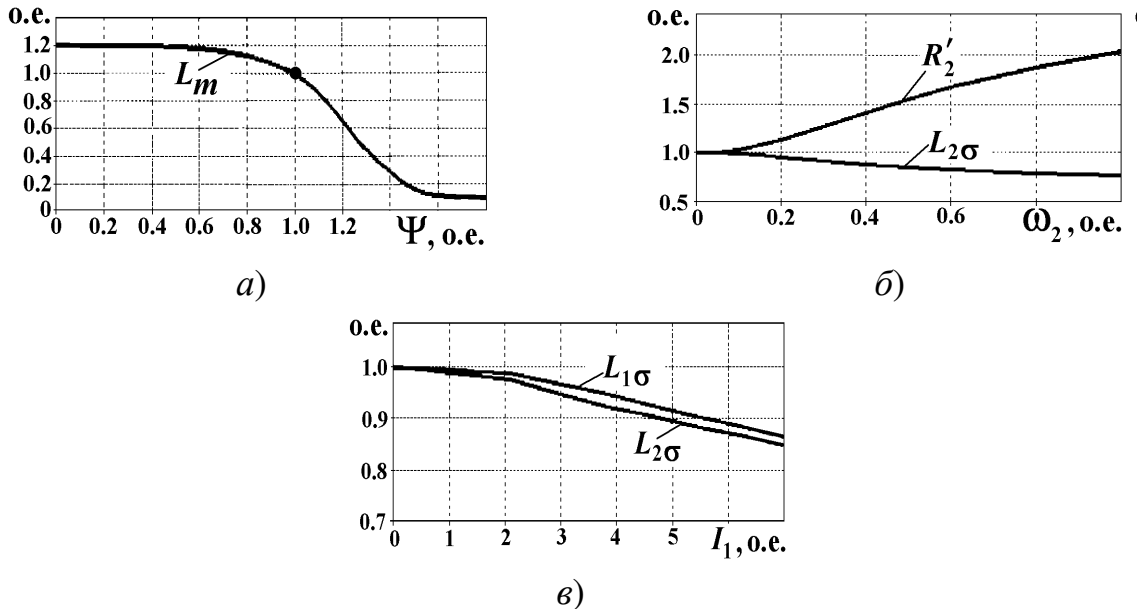


Рисунок 3.5 – Типові статичні залежності змін основних параметрів АД при різних умовах його роботи

При розробці ММ прийнято, що електричні та магнітні кола АД симетричні, а втрати у сталі ротора і вплив гістерезису при перемагнічуванні сталі на форму струмів і потокозчеплень суттєво малі. Підкреслимо, що процес моделювання асинхронного електропривода (АЕП) з АД здійснюється із попередніми етапами настроювання ММ. Пояснимо ці етапи.

На першому, попередньому етапі моделювання, призначеному тільки для визначення невідомих номінальних значень змінних і параметрів АД, шляхом розрахунку статичних значень для сталого номінального режиму АД, оцінюються ефекти насичення магнітної системи основним магнітним потоком, витіснення струму у стержнях ротора, значення втрат у сталі. Тут, також, уточнюються всі параметри схеми заміщення.

На другому етапі, у ММ АД, вже налаштовану на номінальний режим роботи і практично готову для дослідження у складі системи керування, вводяться типові статичні залежності $L_m(\psi)$ і $R'_2(\omega_2)$, наприклад, такі, як

показано на рис. 3.5.

Далі враховується вплив втрат у стали на роботу АД (3.4)–(3.5). Приймаємо максимально допустимі діапазони зміни ковзання s і можливі значення зміни коефіцієнта k : $s \in (0,005 \dots 0,1)$ і $k \in (1,2 \dots 1,7)$. При цьому функція $(1 + s^k) \in (1,0 \dots 1,063)$.

У загальній формі записи, рівняння трифазного АД з короткозамкненим ротором, представлені через узагальнені вектори у системі координат, що обертається з довільною кутовою швидкістю ω_k мають вигляд [201]:

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = R_1 \cdot \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{d\tau} + j\omega_k \cdot \bar{\Psi}_1; \\ 0 = R'_2 \cdot \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{d\tau} + j(\omega_k - \omega) \cdot \bar{\Psi}_2; \\ M = p \cdot L_m \cdot [\bar{i}_1 \cdot \bar{i}'_2*]; \\ J \frac{d\omega}{d\tau} = M - M_c. \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_1 = L_1 \cdot \bar{i}_1 + L_m \cdot \bar{i}'_2; \\ \bar{i}_1 = (L_2 \cdot \bar{\Psi}_1 - L_m \cdot \bar{\Psi}_2) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ \bar{\Psi}_2 = L_m \cdot \bar{i}_1 + L_2 \cdot \bar{i}'_2; \\ \bar{i}'_2 = (L_1 \cdot \bar{\Psi}_2 - L_m \cdot \bar{\Psi}_1) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2). \end{cases} \quad (3.17)$$

При моделюванні на ЕОМ, системи (3.16) і (3.17), що записані у координатах $x - y - 0$, дозволяють замість реальних змінних струмів і напруг обмоток АД оперувати відповідними їм величинами [72]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{1x}}{d\tau} = u_{1x} - \frac{R_1 \cdot L_2 \cdot \psi_{1x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_1 \cdot L_m \cdot \psi_{2x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \omega_k \cdot \psi_{1y}; \\ \frac{d\psi_{1y}}{d\tau} = -\frac{R_1 \cdot L_2 \cdot \psi_{1y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R_1 \cdot L_m \cdot \psi_{2y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} - \omega_k \cdot \psi_{1x}; \\ \frac{d\psi_{2x}}{d\tau} = -\frac{R'_2 \cdot L_1 \cdot \psi_{2x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R'_2 \cdot L_m \cdot \psi_{1x}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + (\omega_k - \omega) \cdot \psi_{2y}; \\ \frac{d\psi_{2y}}{d\tau} = -\frac{R'_2 \cdot L_1 \cdot \psi_{2y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + \frac{R'_2 \cdot L_m \cdot \psi_{1y}}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} + (\omega_k - \omega) \cdot \psi_{2x}; \\ M = \frac{p \cdot L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} (\psi_{1y} \cdot \psi_{2x} - \psi_{1x} \cdot \psi_{2y}); \\ J \frac{d\omega}{d\tau} = M - M_c. \end{cases} \quad (3.18)$$

Використав наведену на рис. 3.4 векторну діаграму, отримаємо

$$\bar{i}_m = \bar{i}_1 + \bar{i}_2, \quad (3.19)$$

і позначив індуктивності розсіювання статорної і роторної обмоток як $L_{1\sigma} = L_1 - L_m$ і $L_{2\sigma} = L_2 - L_m$, вектори потокозчеплення (3.17) можна представити у вигляді системи:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_1 = L_{1\sigma} \cdot \bar{i}_1 + L_m \cdot \bar{i}_m; \\ \bar{\Psi}_2 = L_{2\sigma} \cdot \bar{i}'_2 + L_m \cdot \bar{i}_m. \end{cases} \quad (3.20)$$

Для першого етапу моделювання, використовуючи (3.18) у середовищі *Simulink/Matlab*, розроблена ММ АД, для якої, згідно (3.17), справедливі у координатних осях $x - y - 0$ вирази значень потокозчеплень і струмів:

$$\begin{cases} \Psi_{1x} = L_1 \cdot i_{1x} + L_m \cdot i'_{2x}; \\ \Psi_{1y} = L_1 \cdot i_{1y} + L_m \cdot i'_{2y}; \\ \Psi_{2x} = L_m \cdot i_{1x} + L_2 \cdot i'_{2x}; \\ \Psi_{2y} = L_m \cdot i_{1y} + L_2 \cdot i'_{2y}; \\ \Psi = \sqrt{\Psi_{1x}^2 + \Psi_{1y}^2}; \end{cases} \quad (3.21)$$

$$\begin{cases} i_{1x} = i_{в.ст} + (L_2 \cdot \Psi_{1x} - L_m \cdot \Psi_{2x}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ i_{1y} = (L_2 \cdot \Psi_{1y} - L_m \cdot \Psi_{2y}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ i'_{2x} = (L_1 \cdot \Psi_{2x} - L_m \cdot \Psi_{1x}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2); \\ i'_{2y} = (L_1 \cdot \Psi_{2y} - L_m \cdot \Psi_{1y}) / (L_1 \cdot L_2 - L_m^2), \end{cases} \quad (3.22)$$

де вплив потужності втрат у стали враховано збільшенням активної складової i_{1x} струму статора на попередньо прийняте значення струму втрат в стали $i_{в.ст}$.

Позначимо $i_{1R} = \sqrt{i_{1x}^2 + i_{1y}^2}$ і $i'_{2R} = \sqrt{i'_{2x}{}^2 + i'_{2y}{}^2}$. Тоді коефіцієнт потужності

буде визначатися виразом

$$\cos \varphi = |i_{1x} / i_{1R}|, \quad (3.23)$$

діючі значення струмів фаз статора і ротора

$$I_1 = i_{1R} / \sqrt{3} \quad \text{і} \quad I'_2 = i'_{2R} / \sqrt{3}. \quad (3.24)$$

ККД визначиться з виразу

$$\eta = \frac{M \cdot \omega}{M \cdot \omega + \Delta P_{ст} + (i_{1R}^2 \cdot R_1 + i'_{2R}{}^2 \cdot R'_2)}, \quad (3.25)$$

де попередньо оцінена потужність втрат у сталі $\Delta P_{\text{ст}} \approx (P_{2\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} - P_{2\text{ном}}) \cdot 0,25$ та відповідне їй значення струму втрат $i_{\text{в.ст}} = \Delta P_{\text{ст}} / (\sqrt{3}U_{\text{ном}})$ визначаються при номінальній потужності $P_{2\text{ном}}$ і ККД $\eta_{\text{ном}}$ електродвигуна електрорушії.

Прогонами ММ АД, з відомими значеннями параметрів схеми заміщення (варіюючи значення $\Delta P_{\text{ст}}$, відповідного йому $i_{\text{в.ст}}$, а також x_m), добиваємося для статичного режиму максимально близьких номінальних значень частоти обертання гвинта рушії, ККД, струму статора і $\cos\phi$ (при номінальному статичному навантаженні, що враховує механічні втрати).

На цьому перший етап моделювання закінчується. З усталених значень змінних отримуємо номінальні значення потокозчеплення, втрат у сталі і індуктивного опору кола взаємоіндукції x_m , що є основою для подальшої верифікації моделі і моделювання інших режимів роботи електрорушії АПА.

3.2.2. Верифікація параметрів математичної моделі АД

З метою верифікації запропонованої ММ АД, розглянемо електродвигун типу АО2-12-4 з наступними паспортними даними: $U_{\text{ном}} = 220\text{В}$; $I_{\text{ном}} = 2,1\text{А}$; $n_{\text{ном}} = 1360\text{об/хв}$; $\eta_{\text{ном}} = 0,745$; $\cos\phi_{\text{ном}} = 0,78$; $P_{2\text{ном}} = 800\text{Вт}$; $k_{\text{п}} = 1,8$; $k_i = 7$; $k_m = 2,2$. За окремою методикою були визначені наступні параметри схеми заміщення АД: $R_1 = 10,1\text{Ом}$; $R_2 = 8,5\text{Ом}$; $L_{1\sigma} = 39,5\text{мГн}$; $L_{1\sigma} = 67,2\text{мГн}$, $L_m = 634\text{мГн}$. Для цього електродвигуна в [200] наведені експериментальні діаграми пуску (рис. 3.6) на холостому ході.

Після проведення, як описано вище, усіх етапів налаштування ММ АД, з усталеного режиму роботи при напрузі $U_{\text{ном}} = 220\text{В}$, номінальному навантаженні і аналізі статичних характеристик були визначені його основні параметри: $I_{\text{ном}} = 2,07\text{А}$; $n_{\text{ном}} = 1391\text{об/хв}$; $\eta_{\text{ном}} = 0,756$; $\cos\phi_{\text{ном}} = 0,79$; $P_{2\text{ном}} = 816\text{Вт}$; $k_{\text{п}} = 0,9$; $k_i = 4,5$; $k_m = 1,7$. Аналіз отриманих параметрів показує їх дуже високу збіжність з паспортними даними, що є підтвердженням

верифікації моделі – відповідності ММ реальній роботі АД у статичному номінальному режимі.

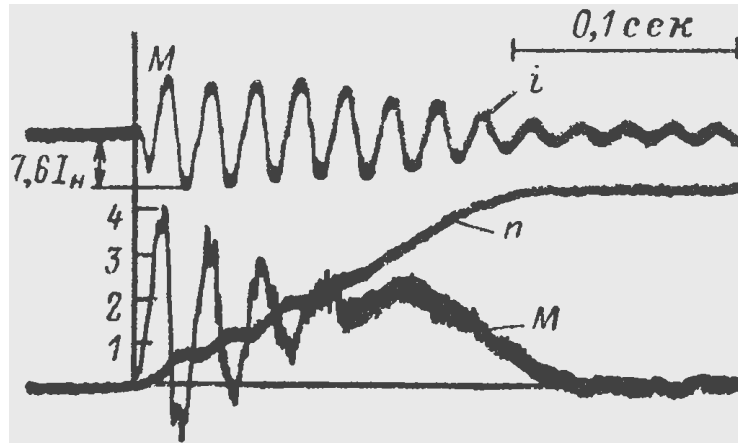


Рисунок 3.6 – Пуск АД типу АО2-12-4 на холостому ході (експеримент, [200])

Зрозуміло, що основний етап моделювання укладений у подальших дослідженнях ММ АД електрорушії, у яку вже вводяться статичні залежності

$$L_m = L_{m_{\text{НОМ}}} \cdot L_m^*(\psi / \psi_{\text{НОМ}}); \quad R_2'(\omega_2) \quad \text{і}$$

$\Delta P_{\text{СТ}} = \Delta P_{\text{СТ}_{\text{НОМ}}} (f / f_{\text{НОМ}})^k (\psi / \psi_{\text{НОМ}})^2 f_1(s, k)$ – відповідно до (3.16). Наприклад, отриманий у результаті моделювання процес пуску АД типу АО2-12-4 на холостому ході, наведено на рис. 3.7.

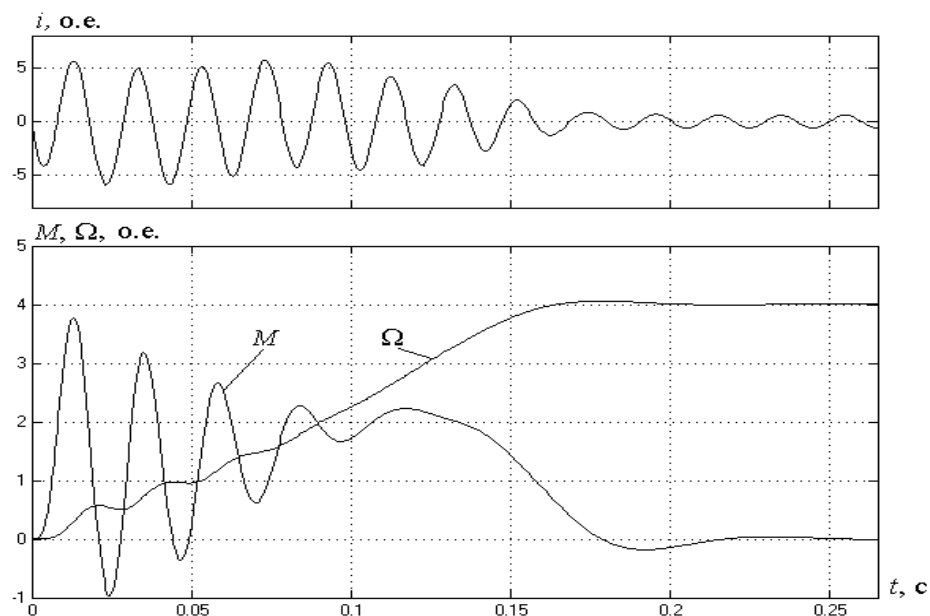


Рисунок 3.7 – Пуск АД типу АО2-12-4 на холостому ході (моделювання)

Зіставлення динамічних процесів пуску (експеримент, рис. 3.6 і моделювання, рис. 3.7) показує їх практично повну відповідність (час розгону

до статичної частоти обертання, пікові значення моменту і споживаного струму фактично збігаються), що також є підтвердженням працездатності уточненої ММ у широкому діапазоні зміни режимів роботи АД електрорушія АПА.

3.2.3. Особливості побудови системи керування маршовим АД системи електроруху АПА

Як показано вище, при деякому, меншому номінального значення, моменті опору M_c є таке значення напруги живлення, при якому забезпечується енергоефективний режим роботи пропульсивного комплексу АПА, а саме, мінімальні втрати потужності у баророзвантаженому АД. Розгляд типових режимів роботи (наприклад, стабілізація заданого курсу) АПА показує, що при зменшенні середнього значення навантаження з боку маршового гвинта суттєво змінюються лише основні результуючі енергетичні характеристики АД – ККД і $\cos\phi$, при цьому швидкість АПА змінюється незначно.

Спосіб регулювання магнітного потоку при зниженні статичного навантаження реалізується шляхом плавної зміни напруги [136], причому процеси керування легко автоматизуються. Очевидно [87, 138], що з невеликими капітальними витратами організовується вся система керування напруги АД електроруху АПА – на основі силового транзисторного інвертора напруги, де у якості керуючого впливу використовуються сигнали датчика струму статора.

При використанні алгоритмів керування, стабілізуючих будь-якої енергетичний параметр (ККД, споживаний струм, коефіцієнт потужності і т.д.), і встановлюючих енергоефективний режим роботи маршового АД, приймається, що регулятор напруги має однозначну, нелінійну, U -образну характеристику. Відомо, що алгоритми керування, які встановлюють енергозберігаючі режими і забезпечують зниження втрат потужності маршового АД, здійснюються різними способами. У тому числі – за рахунок пошукових процедур, автоматично знижуючих і стабілізуючих напругу при

зменшенні статичного навантаження так, щоб забезпечувався екстремум однієї із функцій, наприклад, мінімум споживаного струму. Типовий алгоритм передбачає також функціонування з номінальним магнітним потоком, оскільки робота з оптимальним, за умовами енергозбереження, потоком пов'язана зі зменшенням перевантажувальної здатності АД. Очевидно і те, що магнітний потік повинен автоматично відновлюватися при збільшенні статичного навантаження.

Енергетично оптимальний режим керування АПА можливий при мінімізації споживаної потужності його баророзвантаженого маршового АД: $P_1 = 3u_1i_1$, $\cos \varphi_1 \rightarrow \min$, де система керування автоматично змінює рівень напруги з метою відшукування точки найнижчого рівня споживання електроенергії [64, 210]. Потрібно відзначити, що не завжди [76] мінімум струму статора відповідає мінімуму споживаної потужності, однак для систем електроруху АПА малої потужності цим розходженням можна зневажити.

Основна перевага алгоритму мінімізації струму статора полягає лише у спрощеній, а значить і недорогій, його технічній реалізації при порівнянні із частотними методами керування маршовими двигунами.

Важливо відзначити, що частота обертання АД, а, отже, і маршова швидкість АПА, можуть змінюватися незначно по ряду причин:

- швидкість ідеального холостого ходу незмінна, так як частота джерела живлення майже постійна;
- жорсткість робочої ділянки механічної характеристики АД досить висока (4...9 %);
- і, нарешті, що найважливіше, зміна напруги буде проводитися тільки у тому випадку, коли статичне навантаження тривалий час менше номінального, тобто коли необхідно забезпечення крейсерську швидкість АПА.

Крім того, одним із засобів підвищення дальності дії і часу автономного плавання АПА є застосування пошукових режимів зміни напруги на статорі при керуванні баророзвантаженим АД маршового гвинта. Одним з суттєвих недоліків такого керування є збільшення сумарних втрат

потужності при глибокому регулюванні швидкості АПА. Крім того, традиційний, і багато у чому суб'єктивний підхід до створення систем електроруху укладений у обов'язковому застосуванні промислових перетворювачів частоти (ПЧ).

Слід зазначити, що промислові ПЧ невеликої потужності мають, по-перше, відносно високу відпускну ціну, неприйнятну для рішення задач, аналогічних описаним у [252]. По-друге, такі ПЧ володіють надлишковими функціональними можливостями (вбудовані системи діагностики, захисту, індикація, ідентифікації параметрів АД, порти введення/виводу і ін.). По-третє, вони не розраховані на роботу в умовах суттєво змінюваної напруги джерела енергії, як правило, не мають морського виконання, серійно не виробляються в Україні. Саме тому слід розглядати можливість застосування різного виду недорогих систем керування напругою АД в АПА, аналогічних описаним у [211], що дозволяють мінімізувати сумарні втрати потужності при регулюванні швидкості АПА. Однак на цьому шляху стоїть ще ряд невирішених проблем, пов'язаних з технічним забезпеченням необхідних алгоритмів керування.

3.3 Підвищення енергетичних показників трифазних АД пропульсивних комплексів АПА

3.3.1. Конструкційна модернізація (перепроєктування), як перспективний напрям підвищення енергетичної ефективності АД АПА

Із конструктивних міркувань побудови, а також вимог до тактико-технічних характеристик (ТТХ) вузькоспеціалізованих АПА необхідно регулювання частоти обертання валу гребного електродвигуна у досить вузькому діапазоні (при частоті обертання маршового двигуна від 500 до 3500 об/хв). У більшості відомих конструкцій, керування лінійною швидкістю переміщення АПА здійснюється асинхронними і синхронними електродвигунами гвинтів від перетворювачів частоти (ПЧ) різного типу,

зазвичай – загальнопромислових, інколи – морського виконання та через понижувальний редуктор (див. рис. 1.13). Основна характеристика доцільності застосування такої, побудованої на основі ПЧ, системи електроруху АПА – капітальні витрати. Витрати на виготовлення системи електроруху визначаються, у основному, її матеріаломісткістю G . Слід підкреслити, що матеріаломісткість гнучкого валопроводу, з'єднувальних муфт, редуктора і гребного гвинта є практично постійною величиною для заданого дедвейту АПА.

Вартість конструкційних та ізоляційних матеріалів становить приблизно 25 % вартості всіх матеріалів, які містить у собі АД. Для електродвигунів потужністю до 0,5 кВт однієї і тієї ж висоти вісі обертання, ця вартість практично незмінна і тому може не враховуватися. Єдина можливість зниження загальної матеріаломісткості – знизити матеріаломісткість гребного АД. Однак результуюча енергетична ефективність АД суттєво залежить від кількості застосованих у ньому активних матеріалів (сталі, міді). Для АД матеріаломісткість представляє собою комплексний показник, до якого входять: маса міді обмотувального дроту G_m , маса алюмінію короткозамкненою обмотки ротора G_a , маса сталі статора G_s і ротора G_r . Тому, при конструкційній модернізації (перепроєктуванні), або при створенні нових типів АД для АПА, ці показники повинні бути піддані порівняльному аналізу, оскільки суттєво впливають на результуючу енергетичну ефективність маршового електродвигуна.

У [46, 66, 115, 120, 258] наведені основні напрями удосконалення, принципи і можливості підвищення енергетичної ефективності керованих асинхронних електродвигунів. У цих роботах вказані шляхи розвитку і підвищення енергетичної ефективності (вдосконалення ізоляції, обмотувальних матеріалів, охолодження, сталі) загальнопромислових АД, призначених для масових застосувань. Але абсолютно не відзначені можливості підвищення енергетичної ефективності високочастотних АД малої потужності (з номінальною частотою живлення більшою стандартних 50 чи 60 Гц).

Добре відомі розробки високочастотних (200 і 400 Гц) низьковольтних АД для ручного електроінструменту [164, 217], авіаційної і медичної техніки, потужних високовольтних АД допоміжних систем охолодження тепловозів (100 Гц), тяглових систем наземного електротранспорту та інші. Однак АД малої потужності, що найчастіше, застосовуються на високих частотах обертання (більших 3000 об/хв), що є неприйнятним для пропульсивних комплексів АПА, а характер навантаження системи електроруку АПА і, наприклад, тягової системи електротранспорту, суттєво відрізняється.

Двополюсні АД загальнопромислового призначення (4А, АІР, 5А) потужністю до 1 кВт [46, 66, 255] мають дуже близькі і практично однакові енергетичні показники (ККД – 0,6...0,68, $\cos\phi$ – 0,7...0,77) і матеріаломісткість (загальна маса: стали статора і ротора – 1,35...2,1 кг, міді обмоток – 0,4...0,54 кг). Зусилля конструкторів-електромеханіків спрямовані на збільшення лише часток відсотків ККД і $\cos\phi$, і всі їх можливості удосконалення майже вичерпані.

Перспективним напрямом підвищення енергетичної ефективності є конструкційна модернізація (перепроєктування) АД, у тому числі – для систем електроруку АПА з ПЧ. Така можливість розглянута у [164], де суть перепроєктування укладена у застосуванні замість двополюсних загальнопромислових АД чотирьохполюсних АД. Оцінка енергетичної ефективності і розрахунок втрат модернізованого аналогічним чином АД також проведена у [164]. Однак у цій роботі досліджується можливість конструкційної модернізації серійних АД для роботи від промислових частотних перетворювачів, не змінюючи при цьому довжину машини. Крім того, у [164] використовується власне, оригінальне і недоступне широкому колу дослідників, програмне забезпечення. У [186, 238] показано, що можливості конструкційної модернізації існуючих трифазних загальнопромислових АД, за умов мінімізації витрат, мало досліджені, вимагають обґрунтування, уточнення і подальшого розвитку. Перспективність застосування модернізованих серійних АД пояснюється тим, що при живленні АД напругою з частотою, збільшеною пропорційно числу пар полюсів, відбувається зменшення головних розмірів

статора і ротора. У цьому випадку необхідно: а) забезпечення АД напругою з номінальною частотою 100 Гц [186, 247] при збереженні електромагнітних навантажень; б) зміна головних розмірів статора, ротора і обмотувальних даних [70, 186, 254].

Порівняльні експериментальні дослідження для конкретних типів АД для АПА скрутні, так як виникає необхідність виготовлення у одиничних (експериментальних) примірниках двох-, чотирьох- і шестіполюсних АД з однаковими посадочними місцями. У даний час у таких експериментах немає сенсу, так як сучасна теорія електричних машин сумісно із відомими середовищами моделювання дозволяють досить точно розрахувати очікувані характеристики модернізованого АД. При оціночних розрахунках найефективнішим є метод аналогій для геометрично подібних електричних машин [46]. Тобто, для порівняння варіантів рішень, можна використовувати довідкові дані загальнопромислових АД, наприклад серії 4А [66].

Очевидно, що можлива суттєва економія активних матеріалів і поліпшення енергетичних характеристик при використанні системи ПЧ-АД з модернізованим електродвигуном – у порівнянні з використанням двополюсних АД, що працюють на номінальній частоті 50 Гц. Суттєвий недолік, через який система ПЧ-АД погано впроваджується у АПА – вартість серійних ПЧ, що становить близько 25% від вартості всього пропульсивного комплексу АПА. Слід зазначити, що більшість серійних ПЧ не тільки погано конфігуруються у АПА, але і мають надлишкові для АПА сервісні, налаштувальні, діагностичні та захисні функції, що, безумовно, позначається на їх ціні [259]. Зрозуміло, що виникає необхідність створення більш простих конструктивних і схемотехнічних рішень ПЧ, спеціально призначених для застосування у АПА, що є предметом окремого дослідження.

Аналіз процедур перерахунку параметрів загальнопромислових АД на основі методу аналогій геометрично подібних електричних машин, є об'єктом даного дослідження. Такий аналіз дозволив виявити можливості підвищення енергетичних показників загальнопромислових АД з метою їх застосування у пропульсивних комплексах малогабаритних АПА. Можна стверджувати [46, 70,

238, 247], що конструктивно-технологічні можливості підвищення енергетичних характеристик АД практично будь-якого типу в даний час вже вичерпані. Тому будь-які додаткові можливості підвищення техніко-економічних показників АД, застосовуваних у пропульсивних комплексах АПА, дуже затребувані практикою спеціального кораблебудування.

3.3.2. Попередня оцінка можливостей застосування трифазних загальнопромислових АД на підвищеній частоті джерела живлення

Проведемо аналіз рішення про можливість застосування чотириполосного АД у пропульсивному комплексі АПА. Аналіз проведемо на прикладі порівняння конструкцій найбільш поширених АД, що мають синхронної частоту обертання 3000 об/хв при номінальній частоті мережі 50 Гц. З метою обґрунтування зміни конструкції чотириполосного АД, порівняємо параметри електродвигунів серії 4А основного (загальнопромислового) призначення (табл. 3.1–3.3), однакових за: а) висотою вісі обертання (50 мм); б) номінальній потужності (90 Вт); в) ступенем захисту (IP44); г) кліматичним виконанням (У3); д) способом охолодження (ІСА0141).

Таблиця 3.1 – Номінальні параметри порівнювальних АД [70, 247]

Параметр	4АА50А2У3	4АА50В4У3
ω_0 , рад/с	314	157
P_H , Вт	90	90
s_H , %	8,6	8,6
η_H , %	60	55
$\cos\varphi_H$	0,7	0,6
M_H , Нм	0,31	0,62
ω_H , рад/с	287	143,5
k_{\max}	2,2	2,2
k_{Π}	2,0	2,0
k_i	5,0	5,0

У табл. 3.2 і на рис. 3.8 позначено: D_{a1} і D_{i1} – відповідно, зовнішній та внутрішній діаметри сердечника статора; l_1 – довжина сердечника статора; h_1 і

z_1 – відповідно, висота зубця і число пазів статора; δ – односторонній повітряний зазор між статором і ротором; l_{cp} – середня довжина витка обмотки; d і m – відповідно, діаметр дроту (без ізоляції) і його маса; R – опір фази при 20°C; B_δ , B_{c_1} і B_{z_1} – максимальне значення магнітної індукції, відповідно, в зазорі, спинці і зубцевому шарі статора.

Таблиця 3.2 – Електромагнітні навантаження статорів порівнювальних АД [70, 247]

Параметр	4AA50A2УЗ	4AA50B4УЗ
D_{a_1} , мм	81	81
D_{i_1} , мм	41	46
l_1 , мм	42	50
h_1 , мм	9,6	11,0
z_1 , шт	12	12
δ , мм	0,25	0,25
l_{cp} , мм	294	246
d , мм	0,27	0,31
m , кг	0,44	0,55
R , Ом	82,5	59,1

Таблиця 3.3 – Обмотувальні параметри порівнювальних АД [70, 247]

Параметр	4AA50A2УЗ	4AA50B4УЗ
B_δ , Тл (пасп.)	0,62	0,68
A_1 , А/см (пасп.)	105	152
J_1 , А/мм ² (пасп.)	4,4	4,9
B_{c_1} , Тл (розрах.)	1,51	1,63
B_{z_1} , Тл (розрах.)	1,75	1,84

Порівняльний аналіз даних табл. 3.1 і табл. 3.3 показує, що:

– через менші розміри лобових частин обмотки і більшу висоту зубців, максимальні електромагнітні навантаження (B_δ , A_1) і щільність струму J_1 у чотирьополюсного і шістьохполюсного АД можуть бути суттєво більшими, ніж у двополюсного;

– через відмінності конструкцій і особливості утворення обертового магнітного поля чотирьох- і шістьохполюсним АД, двополюсний двигун, при інших рівних параметрах, має більші значення ККД і коефіцієнта потужності.

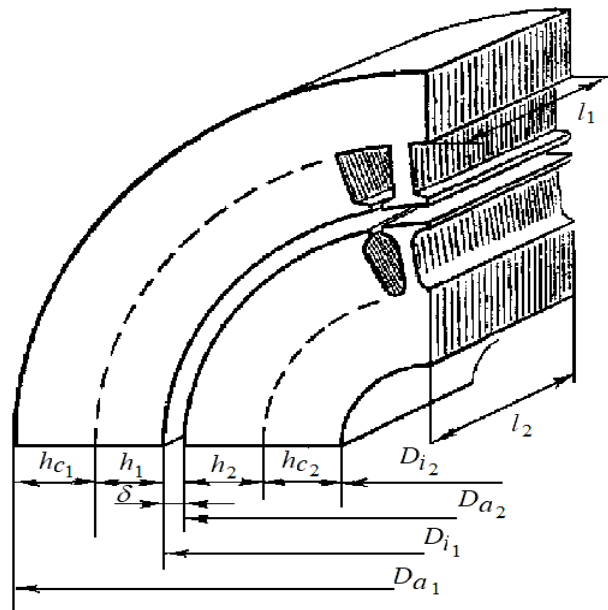


Рисунок 3.8 – Конструкція сердечника статора загальнопромислового і баророзвантаженого АД, використаного для електрорушія АПА

Основними розмірами, що характеризують масогабаритні показники АД, а, отже, і всього пропульсивного комплексу АПА, є внутрішній діаметр статора D_{i1} і довжина сердечника статора l_1 . Зміна діаметру сердечника призведе до змін у технологічному процесі штампування і необхідності розрахунку нової геометрії пазів, що недоцільно з економічних міркувань. Тому будемо розглядати можливість зниження масогабаритних показників АД за рахунок зміни довжини сердечника статора l_1 . При цьому слід зазначити, що кришки і підшипникові вузли двигуна залишаються незмінними, що також позитивно вплине на кінцеву вартість АД.

Таким чином, слід очікувати, що при підвищенні частоти напруги живлення і збереженні незмінними електромагнітних навантажень, ККД і $\cos\phi$ багатополюсних переконструйованих (модернізованих) АД будуть також зростати і можуть навіть перевищити аналогічні значення двополюсних серійних АД. При цьому багатополюсні АД матимуть суттєвий запас потужності і електромагнітного моменту [65, 114, 252], що вкрай необхідно для режимів екстрених маневрів АПА.

3.3.3. Аналітичні залежності і теоретичне обґрунтування послідовності порівняння основних характеристик модернізованих АД

З основного розрахунково-конструктивного рівняння [70] для електричних машин (постійної Арнольда) можна записати

$$D_i^2 l_1 = P_H / (k_B k_{об1} a_i \omega_H B_\delta A_1), \quad (3.26)$$

де для розглянутих машин одного габариту, приймаються постійними: $k_B \approx 1,11$ – коефіцієнт форми кривої синусоїдального поля у зазорі; $k_{об1} = 0,96$ – обмотувальний коефіцієнт для основної гармоніки ЕРС; $a_i \approx 0,64$ – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття, рівний відношенню середнього значення магнітної індукції у зазорі $B_{\delta_{cp}}$ до її максимального значення B_δ ; A_1 – лінійне навантаження, що визначається з вираження

$$A_1 = \frac{2m_1 w_1 I_1}{\pi D_1},$$

у якому позначені: m_1 – число фаз статора і i_1 – струм фази статора, А. Без великої похибки можна прийняти, що залежність $A_1 = f(l_1, f_1, w_1)$ лінійна відносно електромагнітного навантаження $B_\delta = f(l_1, f_1, w_1)$. Отже, можна вважати, що величина A_1 буде залишатися незмінною при зменшенні довжини статора l_1 , збільшенні частоти f_1 і пропорційній зміні кількості витків w_1 .

Записаний у (3.37) добуток $A_1 B_\delta$ повного струму пазового шару A_1 статора (лінійного навантаження) на максимальне значення магнітної індукції у зазорі B_δ для кожної електричної машини величина постійна. Значення магнітної індукції у зазорі машини [187] визначається виразом:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_1 10^{-6}},$$

де Φ – основний магнітний потік статора, Вб; $\tau = \pi D_1 / (2p)$ – полюсний розподіл, мм. У свою чергу магнітний потік машини визначається виразом:

$$\Phi = \frac{E_1}{4k_B f_1 w_1 k_{об1}},$$

де E_1 – ЕРС статора, В; w_1 – число послідовно з'єднаних витків обмотки фази статора; f_1 – частота напруги.

Вираз

$$D_i^2 l_1 \approx P_H / \omega_H = M_H, \quad (3.27)$$

пояснює відоме твердження [155, 238] про те, що при заданих потужності P_H і електромагнітних навантаженнях A_1 і B_δ витрата активних матеріалів при виготовленні електричної машини буде тим менше, чим вище його номінальна частота обертання ω_H .

Відношення K_M моментів чотиріполюсного і двополюсного АД:

$$K_M = \frac{(D_i^2 l_1)_4}{(D_i^2 l_1)_2} = \frac{(46 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{(41 \cdot 10^{-3}) \cdot 42 \cdot 10^{-3}} \cong 1,5$$

отримано з головних геометричних розмірів машин (табл. 3.2) при рівних частотах обертання. Це відношення дозволяє стверджувати про можливість зниження довжини осердя статора чотиріполюсної машини, приблизно, з 50 мм до 33,4 мм, при забезпеченні такого ж самого номінального моменту, як і у двополюсної машини. При цьому, також, необхідно забезпечити незмінність електромагнітних навантажень (B_δ, A_1).

Зменшимо, із 10 % запасом за моментом, довжину статорного пакета до значення $l_1 = 37$ мм і, згідно із рис. 3.8 і даними, наведеними у табл. 3.1–3.3 визначимо, з метою порівняння, ряд конструктивних і енергетичних параметрів АД. Відзначимо, що число витків у обмотці чотиріполюсних АД, при переході на вдвічі більшу частоту живлення (100 Гц), має бути вдвічі меншим. Тому при перемиканні на паралельне з'єднання двох наявних у АД послідовних гілок, число витків стане у два рази меншим. При цьому опір зменшиться у чотири рази, що викличе відповідне зменшення електричних втрат на збудження. Відносно ковзання також знизиться у два рази (так як жорсткість робочої ділянки механічної характеристики залишається незмінною), що також викличе зниження, пропорційне ковзанню, електричних втрат у обмотці ротора.

Основні магнітні втрати (на гістерезис і вихрові струми) у АД визначаються втратами у сталі статора

$$\Delta P_{ст1} = \Delta P_{c1} + \Delta P_{z1}, \quad (3.28)$$

де ΔP_{c1} і ΔP_{z1} – відповідно втрати в спинці і зубцевому шарі статора.

Втрати у спинці і зубцевому шарі статора визначаються за формулами [187, 238]:

$$\Delta P_{c1} = k_{\tau} P_{1,0/50} (f / f_{н})^{\beta} B_c^2 m_{c1}, \quad (3.29)$$

$$\Delta P_{z1} = k_{\tau} P_{1,0/50} (f / f_{н})^{\beta} B_z^2 m_{z1}, \quad (3.30)$$

де $k_{\tau} = 1,7$ – технологічний складальний коефіцієнт; $P_{1,0/50}$ і β – відповідно, питомі магнітні втрати, Вт/кг, і показник ступеня, що залежать від марки застосованої сталі (для сталі марки 2211: $P_{1,0/50} = 2,6$ Вт/кг і $\beta = 1,5$; для сталі марки 2312: $P_{1,0/50} = 1,75$ Вт/кг і $\beta = 1,4$; $1,5 \text{ Тл} < B_c < 1,65 \text{ Тл}$; $1,75 \text{ Тл} < B_z < 1,95 \text{ Тл}$); m_{c1} і m_{z1} – відповідно маса сталі спинки і зубцевого шару, кг, які визначаються із розрахункового обсягу, який, у свою чергу, визначається із [187, 238] при щільності електротехнічної сталі $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Втрати у сталі ротора $\Delta P_{ст2}$ вкрай малі і можуть бути прийняті рівними

$$\Delta P_{ст2} = 0,1 \Delta P_{ст1}. \quad (3.31)$$

Електричні втрати у міді статора визначаються за виразом

$$\Delta P_{e1} = 3 I_{н}^2 R_{75^{\circ}C}, \quad (3.32)$$

а у обмотці ротора –

$$\Delta P_{e2} = (P_{ем} - \Delta P_{ст1} - \Delta P_{e1}) s_{н}, \quad (3.33)$$

де $P_{ем} = 3 U_{н} I_{н} \cos \varphi_{н}$ – електромагнітна потужність у повітряному проміжку δ .

Механічні втрати приймаємо постійними:

$$\Delta P_{мех} = 0,01 P_{н}. \quad (3.34)$$

Додаткові втрати:

$$\Delta P_{дод} = 0,005 P_{ем}. \quad (3.35)$$

Використовуючи дані, що описують геометрію напівзакритого трапецієподібного пазу, розраховуються маси активних частин двигуна, що

входять у (3.29) і (3.30), і пов'язані з цим втрати. Потім визначаються [233] параметри схеми заміщення фази АД і розраховуються коефіцієнти потужності.

Магнітні втрати (3.4) у сталі від вихрових струмів і гістерезису залежать від частоти джерела живлення f , другого ступеня амплітуди індукції B і функції $f_1(s, k)$ ковзання s [187, 238].

На частоті 100 Гц ці втрати вище, ніж на частоті 50 Гц. Але за рахунок зниження електричних втрат і маси сталі статора, відносні сумарні втрати у скороченому АД стають меншими (табл. 3.5). Зростають потужність на валу (102 Вт) і результуючий ККД АД. Слід зазначити, що активний опір фази статора можна розрахувати за виразом

$$R_1 = \frac{\rho_m w_1 (l_1 + l_{\text{л}}) \cdot 2}{q_{\text{пр}}}, \quad (3.36)$$

де ρ_m – питомий електричний опір міді, $l_{\text{л}}$ – довжина лобової частини обмотки статора, $q_{\text{пр}}$ – площа поперечного перерізу проводу обмотки статора. Зрозуміло, що при зміні числа провідників у пазу статора необхідно змінити перетин провідників обмотки статора для збереження сталості коефіцієнта заповнення паза міддю. Нове значення перерізу проводу можна визначити за формулою:

$$q'_{\text{пр}} = q_{\text{пр}} \frac{w_1}{w'_1} = q_{\text{пр}} / K_w, \quad (3.37)$$

і по каталогу вибрати найближче стандартне значення. Величини $q'_{\text{пр}}$ і w'_1 представляють собою нові значення перерізу проводу і кількості витків обмотки статора відповідно.

Згідно виразів (3.36) і (3.37) опір R_1 прямо пропорційний другому ступеню числа витків обмотки статора і довжині сердечника статора:

$$R_1 = (K_1 K_l + K_{\text{л}}) K_w^2 R_{1\text{н}}, \quad (3.38)$$

де $R_{1\text{н}}$ – номінальне значення активного опору фази статора при частоті 50 Гц; K_1 і $K_{\text{л}}$ – коефіцієнти, що залежать від співвідношення довжин активної l_1 і лобовій $l_{\text{л}}$ частин обмотки статора:

$$K_1 = \frac{l_1}{l_1 + l_{\pi}}, \quad K_{\pi} = \frac{l_{\pi}}{l_1 + l_{\pi}} \quad (3.39)$$

Індуктивні опори розсіювання статора і ротора розрахуємо за виразами:

$$X_1 = \frac{\pi f_1 I_1 w_1^2}{2 p q_1 \cdot 10^5} \lambda_1, \quad X_2' = \frac{7,9 k_{\text{пр1}} f_1 I_2}{10^6} \lambda_2, \quad (3.40)$$

де λ_1 і λ_2 – коефіцієнти магнітної провідності розсіювання статора і ротора відповідно, q_1 – кількість пазів на полюс і фазу, $l_2 = l_1$ – довжина осердя ротора, $k_{\text{пр1}}$ – коефіцієнт приведення опору обмотки ротора до обмотки статора, пропорційний другому ступеню числа витків обмотки статора ($k_{\text{пр1}} \approx w_1^2$). Коефіцієнти λ_1 і λ_2 мають слабку нелінійну залежність від довжини сердечника статора l_1 і цією залежністю нехтуємо. З огляду на викладене, можна вважати, що індуктивні опори розсіювання статора і ротора визначаються виразами:

$$X_1 = K_I K_f K_w^2 X_{1\text{н}}, \quad X_2' = K_I K_f K_w^2 X_{2\text{н}}, \quad (3.41)$$

де $X_{1\text{н}}$ і $X_{2\text{н}}$ – номінальні значення індуктивних опорів розсіювання статора і ротора при частоті 50 Гц.

У найзагальнішому випадку головний індуктивний опір обмотки статора X_m залежить від величин l_1 , w_1 і f_1 нелінійно, головним чином через нелінійність кривої намагнічування сталі, із якої виготовляється статор і ротор машини. Однак, нехтуючи виникаючою похибкою, можна стверджувати, що величина головного індуктивного опору X_m прямо пропорційна другому ступеню числа витків обмотки статора, частоті напруги живлення і довжині сердечника статора:

$$X_m = K_I K_f K_w^2 X_{m\text{н}}, \quad (3.42)$$

де $X_{m\text{н}}$ – номінальне значення головного індуктивного опору обмотки статора при частоті 50 Гц.

3.3.4. Результати аналізу порівнюваних асинхронних електродвигунів електрорушіїв АПА

Використовуючи викладену вище послідовність розрахунків, основні результати порівняння номінальних параметрів однакових за висотою вісі обертання АД зведені у табл. 3.4 і 3.5.

З табл. 3.5 видно, що наприклад, маса активних матеріалів може бути суттєво знижена (з 1,52 до 1,32 кг) при забезпеченні більш високого результуючого ККД (61%).

Таблиця 3.4 – Основні паспортні та розрахункові номінальні параметри порівнюваних АД електрорушіїв АПА

Номінальні параметри	4AA50A2У3	4AA50B4У3, стандартний	4AA50B4У3, укорочений
Частота джерела живлення, f_n , Гц	50	100	100
Момент, M_n , Нм	0,31	0,46	0,34
Швидкість, ω_n , рад/с	287	300	300
Потужність, P_n , Вт	90	138	102
Струм фази, I_{1n} , А	0,32	0,50	0,37

Таблиця 3.5 – Конструктивні та енергетичні параметри порівнюваних АД електрорушіїв АПА

Номінальні параметри	4AA50A2У3	4AA50B4У3, стандартний	4AA50B4У3, укорочений
1	2	3	4
Обмотка статора	Без змін	Перекомутація гілок (→→→→→)	Перекомутація гілок (→→→→→)
Діаметр дроту, d , мм	0,27	0,31	0,31
Середня довжина, мм:			
l_b , витка	294	246	220
l_d , лобовій частині	105	73	73
l_p , робочої частини	42	50	37
Опір фази, $R_{75^\circ C}$, Ом	98	17,5	15,7
Втрати у міді статора, ΔP_{e1} , Вт	30,1	13,1	6,5
Втрати у обмотці ротора, ΔP_{e2} , Вт	9,3	7,8	5,3

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4
Маса / обсяг, кг/мм ³ :			
спинки	0,67/85900	0,45/58000	0,33/42980
зубців	0,42/53850	0,69/88157	0,51/65320
статора	1,09/139750	1,14/146157	0,84/108300
ротора	0,43/55440	0,65/83050	0,48/61500
Маса активної частини, кг	1,52	1,79	1,32
Втрати у сталі статора, $\Delta P_{ст1}$, Вт	10,1	44,1	37,2
Втрати у сталі ротора, $\Delta P_{ст2}$, Вт	1,0	4,4	3,7
Механічні втрати, $\Delta P_{мех}$, Вт	9,0	14,0	11,0
Додаткові втрати, $\Delta P_{дод}$, Вт	0,8	1,2	1,0
Сумарні втрати, ΔP_{Σ} , Вт	60,3	84,6	64,7
Номінальний ККД АД, η_H	0,6	0,62	0,61
Коефіцієнт потужності, $\cos\varphi_H$	0,7	0,68 (0,98)	0,68 (0,98)
Номінальний ККД ЧП, $\eta_{П}$	–	0,95	0,95
Енергетичний фактор, k_e	0,42	0,57	0,56

Примітка: у дужках вказані значення $\cos\varphi$ при установці у джерело живлення АПА активного коректора коефіцієнту потужності

Порівняльний аналіз обмотувальних даних і геометричних розмірів АД малої потужності, запропонованих для застосування у пропульсивному комплексі АПА, показує, що через менші розміри лобових частин обмотки, більшої висоти зубців і більшого кроку укладання обмотки, максимальні електромагнітні навантаження у чотирьох- і шістьохполюсних двигунів помітно більші, ніж у двополосного АД системи електроруху.

Виготовлення активної частини двигуна зі сталі марки 2311 з великим вмістом кремнію дозволяє знизити абсолютні втрати у сталі статора і ротора, і тим самим збільшити результуючий ККД АД ще на 0,8...1,2 %. Таке підвищення ККД пояснюється деякими особливостями хімічного складу

сучасних електротехнічних сталей, зокрема наявністю кремнію, що запобігає формуванню хімічних сполук заліза (FeO і Fe_3C), які збільшують втрати на гістерезис.

Питомий електричний опір електротехнічної сталі ρ залежить від кількості кремнію. Опір тим вище, чим більше вміст кремнію у сталі (сталі марки Е1 мають опір $\rho = 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, а марки Е4 – $\rho = 0,6 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$). Наявність кремнію у залізі у кількості 4 % і більше збільшує питомий електричний опір ρ_u порівнянні із чистим залізом, у результаті чого помітно зменшуються втрати на вихрові струми. Індукція насичення B_s заліза зі збільшеним вмістом кремнію у ньому, значно підвищується (при 6,4 % кремнію, $B_s = 2800 \text{ Гс}$). Збільшення вмісту кремнію призводить до підвищення результуючого ККД електродвигуна, проте зростає крихкість сталі, тобто погіршується механічна міцність конструкції двигуна. Тому добавки кремнію до 4,8 % – граничні.

Відзначимо, що для чотиріполюсного АД, на відміну від двополюсного, можливе застосування і анізотропної холоднокатаної сталі, наприклад, марки 3413 із товщиною листа 0,35 мм ($P_{1,5/50} = 1,3 \text{ Вт/кг}$, $P_{1,7/50} = 1,9 \text{ Вт/кг}$), що дасть збільшення результуючого ККД ще, не менше ніж, на 0,2%. Таке підвищення ККД пояснюється особливостями технологічного процесу виробництва сучасних електротехнічних сталей. Розрізняють холодно- і гарячекатану електротехнічну сталь. Залізо має кубічну кристалічну структуру. Для АД бажано, щоб усі кристалики заліза у листі вишикувалися (при прокатці) у ряди за напрямком ребер куба (анізотропія). Це досягається багаторазовою прокаткою листів з сильним обтисненням і відпалом у атмосфері водню. Так сталь очищується від кисню і вуглецю, кристали укрупнюються і орієнтуються у напрямку прокатки. При такій технології виходить текстурована сталь (анізотропна сталь). У анізотропній сталі магнітні властивості у напрямку прокатки помітно вищі, ніж у звичайній гарячекатаної сталі. Листи високоякісної текстурованої сталі виготовляються тільки холодною прокаткою,

яка розвинена в Україні. Тому магнітна проникність сталі набагато вища, а втрати на гістерезис менші, ніж у горячекатаних листів. Крім того, у більш тонкої холоднокатаної текстурованої сталі індукція у слабких магнітних полях зростає сильніше, ніж у горячекатаної. Іншими словами, крива намагнічування у слабких полях розташовується значно вище кривої намагнічування горячекатаної сталі (при індукції 1,0 Тл у напрямку прокатки магнітна проникність $\mu_m = 50000$) [137].

Основною перевагою запропонованої модернізації АД для АПА є порівняно проста, що забезпечує таку конструкційну модернізацію, технологія. При реалізації цієї технології немає необхідності виготовляти нові штампи, не потрібно виготовляти нові кришки і підшипникові вузли. Можна застосовувати вкрай прості перетворювачі частоти, у яких відсутні надлишкові функціональні можливості. Деякі з можливих простих технічних рішень наведені у [129, 133, 211]. Такі перетворювачі не містять надлишкових внутрішніх захистів, автоматичної настройки параметрів, вузлів ідентифікації параметрів схеми заміщення, індикації, самодіагностики і саме тому недорогі і вкрай технологічні при серійному виробництві.

Рішення про використання багатополюсних АД на підвищеній частоті джерела живлення вкрай затребуване у АПА, що забезпечують задачі, аналогічні наведеним в [65, 217], задачі цивільні. Тому витрати матеріальних і часових ресурсів є вкрай важливими і пріоритетними для України.

Безумовно, що наведені основні результати порівняльних розрахунків (табл. 3.4, 3.5) вимагають підтвердження на більшій кількості порівнюваних АД із однаковою висотою вісі обертання. Також потрібне уточнення електромагнітних навантажень після переконструювання/модернізації, проведення додаткових, уточнюючих, експериментальних досліджень запропонованих рішень. Саме ці задачі є пріоритетними у подальших дослідженнях.

Слід підкреслити, що у роботі не ставилася задача оптимального перепроектування і створення нового АД, а була лише показана можливість і

доцільність використання наявних, невикористаних, матеріальних ресурсів – переконструювання (конструкційної модернізації, перепроєктування) існуючих на базах зберігання, недорогих, серійних АД малої потужності – з метою їх ефективного використання у багатоцільових АПА. Саме тому номінальна частота джерела живлення не оптимізується, а визначається лише застосуванням того чи іншого багатополосного АД у русійному комплексі конкретного типу АПА. Так, частота живлення 100 Гц обрана тільки для ілюстрації, з метою пояснення послідовності проектного синтезу, для оцінки результуючої енергоефективності електрорушія АПА, для того, щоб показати виявлені переваги пропонуваніх рішень.

Існуюча проблема побудови АПА на існуючих потужностях суднобудівних підприємств України, полягає у максимально швидкому оснащенні багатоцільових АПА енергоефективним і недорогим пропульсивним комплексом і пов'язана із вирішенням низки приватних задач.

Одна з таких задач полягає у тому, щоб створити на основі простих систем електроруху такий АПА, який може забезпечити виконання спеціальних технологічних функцій, близьких до [252] і при цьому бути застосованим для виконання цивільних, суто мирних, задач. Звичайно, слід ураховувати, що при створенні таких нових для України і високотехнологічних пристроїв, як АПА, необхідно забезпечити: а) енергоефективне керування частотою обертання пропульсивного комплексу АПА із мінімумом капітальних і часових витрат; б) виконання ряду додаткових задач і вимог до функціонування АПА, у тому числі до джерела енергії, систем керування, навігації, стабілізації курсу, окремих режимів роботи, позиціонування, зв'язку, забезпечення функціонування додаткових пристроїв, механізмів, систем зв'язку і інших.

У цілому, необхідно вирішувати задачу несуперечливого проектування багатоцільового судна [210]. Тобто мінімізувати собівартість АПА, забезпечити мінімальні масогабаритні показники при максимально можливому спеціальному корисному навантаженні, мінімізувати час проектування і

будівництва АПА. Така задача вирішується тільки на основі використання системного підходу [41, 159].

3.3.5. Енергетична оптимізація електрорушії використанням методів повільного регулювання напруги АД

Найчастіше енергетична оптимізація АД повільним регулювання напруги застосовується до асинхронних електроприводів, що використовують тиристорні перетворювачі змінної напруги [20, 195, 214]. У загальному випадку, 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 електродвигуна.

3.3.5.1. Пропонується наступна енергетична оптимізація режимів роботи АД електрорушіїв АПА при екстремальному регулюванні напруги за струмом статора. У якості базового рівняння приймемо відомий вираз для струму АД при неномінальній напрузі [3]:

$$i = \sqrt{i_0^2 u^2 + (1 - i_0^2) \frac{m^2}{u^2}},$$

де i_0 – струм холостого ходу двигуна; i, u, m – відповідно струм напруга і момент навантаження АД. Усі величини виражені у відносних одиницях (в. о.).

Взявши похідну струму i за напругою u і прирівнявши її до нуля, отримаємо вираз для оптимальної напруги, при якій струм набуває мінімального значення:

$$u_{\text{опт}} = 4 \sqrt{\frac{(1 - i_0^2)}{i_0^2} m^2}.$$

Підставивши оптимальне значення $u_{\text{опт}}$ у вихідний вираз для струму, отримаємо залежність мінімального значення струму від моменту навантаження m :

$$i_{\min} = \sqrt{i_0 m \sqrt{2(1-i_0^2)}}.$$

Вирішуючи останні два рівняння щодо моментів, отримуємо:

$$m = \frac{i_{\min}^2}{i_0 \sqrt{2(1-i_0^2)}}; \quad m = \frac{u_{\text{опт}}^2 i_0}{\sqrt{1-i_0^2}},$$

а прирівнявши праві частини обох виразів

$$\frac{i_{\min}^2}{i_0 \sqrt{2(1-i_0^2)}} = \frac{u_{\text{опт}}^2 i_0}{\sqrt{1-i_0^2}}$$

отримаємо закон екстремального регулювання напруги:

$$i_{\min} = \sqrt{2} i_0 u_{\text{опт}}.$$

Як видно, закон регулювання виражається лінійною залежністю (лінія проходить через початок координат, її крутизна залежить від струму холостого ходу двигуна, збільшуючись з ростом останнього).

3.3.5.2. Пропонується наступна енергетична оптимізація АД шляхом підтримки оптимального ковзання (швидкості). Для обґрунтування цього способу виразимо втрати у електродвигуні через параметри його Т-подібної схеми заміщення (рис. 3.9) [160, 187]:

$$\Delta P = 3I_1^2 r_1 + 3I_2'^2 r_2' + 3I_{0a}^2 r_0, \quad (3.43)$$

де I_{0a} – активна складова струму намагнічування.

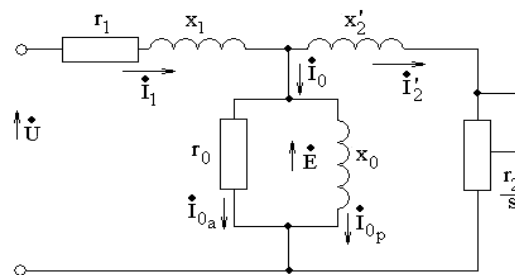


Рисунок 3.9 – Схема заміщення АД електрорушія АПА

Для спрощення подальших викладень у вираженні для втрат не враховані механічні та додаткові втрати, а електромагнітна потужність, що передається від статора до ротора, дорівнює добутку моменту на кутову швидкість електромагнітного поля $P_1 = M\omega_0$. Ця потужність ділиться на дві частини, одна з яких передається до валу двигуна, що обертається зі

швидкістю ω : $P = M\omega$, а друга частина виділяється у вигляді теплоти у роторному ланцюзі двигуна:

$$P = P_1 - P = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s. \quad (3.44)$$

Якщо врахувати, що для реальних асинхронних машин $r_0 \gg x_0$, а при малих значеннях ковзань, відповідних роботі двигуна на лінійній частині його механічної характеристики, можна прийняти, що $r_2' / s \gg x_2'$, тобто можна отримати наступні співвідношення для схеми заміщення:

$$\begin{aligned} I^2 &\approx I_2'^2 + I_{0p}^2; \\ E^2 &\approx (I_2' \frac{r_2'}{s})^2 = \frac{3I_2'^2 r_2' \frac{1}{s} r_2'}{3} = \frac{M\omega_0 r_2'}{3s}, \end{aligned} \quad (3.45)$$

де I_{0p} – реактивна складова струму намагнічування.

З урахуванням (3.45) отримуємо такий вираз для втрат:

$$\begin{aligned} \Delta P &= 3I_1^2 r_1 + 3I_2'^2 r_2' + 3I_{0a}^2 r_0 = 3I_2'^2 r_2' (1 + \frac{r_1}{r_2}) + 3I_{0p}^2 r_1 + 3I_{0a}^2 r_0 = \\ &= M\omega_0 s (1 + \frac{r_1}{r_2}) + \frac{M\omega_0 (\frac{r_1 r_2'}{x_0^2} + \frac{r_1^2}{r_0})}{s}, \end{aligned} \quad (3.46)$$

де $I_{0p} = E / x_0$, $I_{0a} = E / r_0$.

Ковзання $s_{\text{опт}}$, відповідне мінімуму втрат, визначається з виразу:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta P}{ds} &= M\omega_0 (1 + \frac{r_1}{r_2}) - \frac{M\omega_0}{s^2} (\frac{r_1 r_2'}{x_0^2} + \frac{r_1^2}{r_0}) = 0, \\ s_{\text{опт}} &= \frac{r_2'}{x_0} \sqrt{((x_0^2 / r_0) + r_1) / (r_2' + r_1)}. \end{aligned} \quad (3.47)$$

Як бачимо, забезпечення мінімальних втрат у двигуні електрорушії АПА вимагає підтримки (стабілізації) постійного оптимального ковзання, визначеного виразом (3.47). Ця властивість дозволяє забезпечити мінімізацію втрат у системі стабілізації із зворотним зв'язком за ковзанням або швидкістю:

$$\Delta P_{\text{min}} = 2\omega_0 M \sqrt{(r_1 + r_2') (\frac{r_1}{x_0^2} + \frac{1}{r_0})}.$$

Аналогічні дослідження на екстремум виразів для струму статора

$$I_1^2 = (I_2' + I_{0a})^2 + I_{0p}^2 \approx I_2'^2 + 2I_2'I_{0a} + I_{0p}^2 = \frac{M\omega_0}{3} \left(\frac{s}{r_2'} + \frac{r_2'}{s x_0^2} + \frac{2}{r_0} \right)$$

і активної споживаної потужності

$$P_{\text{потр}} = P_1 + 3I_1^2 r_1 + 3I_{0a}^2 r_0 = M\omega_0 \left(1 + \frac{s r_1}{r_2'} + \frac{r_1 r_2'}{s x_0^2} + \frac{r_2'}{s r_0} \right).$$

дозволяють отримати співвідношення для ковзань, що забезпечують мінімум струму статора $s_I = r_2' / x_0$ і мінімум споживаної потужності

$$s_N = r_2' / \sqrt{1 + x_0^2 / (r_0 r_1 / x_0)}.$$

Комплексна реалізація розглянутих способів енергозбереження АЕП запропонована і здійснена автором дослідження у якості навчально-наукових дослідних лабораторних стендів науково-дослідних лабораторій «Енергозбереження в електроприводі» та «Технічних засобів автоматизації систем контролю і керування транспортних засобів», введених в експлуатацію в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (Додаток А).

Так, наприклад, у лабораторному стенді «Дослідження енергетичних характеристик АЕП при різних схемах з'єднання обмотки статора» передбачено два режими роботи установки: ручний, при комутації обмотки статора і автоматичний. В ручному режимі здійснюється експериментальне визначення енергетичних характеристик двигуна. В автоматичному режимі шляхом підтримки постійної оптимальної швидкості і відповідної зміни напруги забезпечуються умови мінімальних втрат при змінах відносного навантаження $m = M_c / M_{cH}$ від $m = 0$ до $m = 1$.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Удосконалені математичні моделі електрорушійного комплексу АПА з баророзвантаженим асинхронним електродвигуном для різного роду і типів систем живлення. Такі моделі може бути використані при

алгоритмічному забезпеченні процесів просторового руху АПА, для подальших досліджень роботи складних морських рухомих об'єктів, у тому числі для багатоцільових АПА та з урахуванням основних і суттєвих нелінійних збурювальних дій.

2. Перевірка працездатності і верифікація удосконалених математичних моделей проводилася порівнянням розрахункових даних з експериментальними – авторськими і отриманими іншими дослідниками. Розрахункові дані отримані у результаті математичного моделювання за допомогою розроблених *Simulink*-моделей, що містять системи рівнянь вдосконаленої математичної моделі, нелінійності і використовують запропоновані принципи ідентифікації параметрів схем заміщення АД.

3. Розрахунковим шляхом встановлено, що для баророзвантаженого АД типу 4А56А2, встановленого у системі електроруху АПА, мінімум споживаного струму відповідає напрузі, приблизно рівній 80 % номінального значення і практично збігається з максимумом ККД. Це залишається справедливим (з урахуванням нелінійності магнітної системи) при зменшенні напруги і різних, менших номінального значення, статичних навантаженнях. У розглянутому прикладі споживаний струм АД електрорушії стає меншим номінального на 8 %, а результуюче значення ККД системи зростає на 5%.

4. Отримані вирази (3.14) і (3.15) дозволили знайти значення коефіцієнту номінальних втрат потужності і величини можливого збереження потужності (3.15) при керуванні зміною напруги. Саме це підвищує дальність автономної дії АПА.

5. Аналіз розрахункових залежностей ККД і струму статора (рис. 3.2) для баророзвантаженого АД малої потужності при зміні напруги і різних відносних статичних навантаженнях, дозволив сформулювати і встановити особливості і вимоги до системи керування електрорухом АПА. Застосування спеціалізованих пристроїв керування напругою, що встановлюють енергоефективні режими і забезпечують зниження втрат потужності баророзвантаженого АД, дозволяють алгоритмізувати задачі

зниження сумарної споживаної активної потужності. Це гарантує роботу АД при максимумі ККД або мінімумі споживаного струму, збільшення дальності автономної роботи АПА.

6. Встановлені вимоги до математичних моделей АД гребного гвинта, як основного елементу системи електроруху АПА. Уточнено та доповнено відомі математичні моделі АД: а) залежностями, що описують нелінійність кривої намагнічування магнітопроводу статора; б) урахуванням втрат у сталі додаванням до струмів статора активних складових струму, обумовлених цими втратами. Ці уточнення і доповнення, спільно з урахуванням зміни параметрів АД у залежності від зміни режимів його роботи – напруги, частоти, і, особливо, суттєвої нелінійності зміни навантаження на валу АД від гребного гвинта, дозволяють використовувати уточнені математичних моделей АД при дослідженні та оптимізації систем електроруху автономних плавальних апаратів.

7. Верифікація уточненої математичної моделі АД системи електроруху АПА дозволяє рекомендувати її широкому колу фахівців електромеханіків.

8. У результаті оцінки можливостей застосування багатополюсних АД при підвищеній частоті джерела живлення встановлено, що таке застосування АД є ефективним, обґрунтовується методами аналогії геометрично подібних електричних машин і теорією електричних машин. Встановлено, що така можливість з'являється при перекладі чотирьох- або шістьохполюсних трифазних асинхронних електродвигунів на підвищену (у два або три рази) номінальну частоту джерела живлення, за умови забезпечення необхідних електромагнітних навантажень.

9. Порівняння основних технічних і енергетичних характеристик для різних конструктивних переробок однакових за висотою вісі обертання АД проведено на основі аналізу техніко-економічних показників трифазних АД для електрорушіїв АПА. Аналіз проведено для технічно нескладної зміни конструкції АД, в основному – укороченням довжини статора і відповідного переконструювання обмоток. У запропонованому методі наведені основні

розрахункові співвідношення, що дозволяють дати порівняльну оцінку масогабаритним і енергетичним параметрам електродвигунів.

10. На розрахунковому прикладі проведено порівняння переконструювання електродвигунів 4AA50A2 і 4AA50B4. Встановлено, що після мінімальної конструктивної переробки, потужність переконструюваного електродвигуна електрорушія зростає з 90 до 102 Вт. При цьому довжина осердя статора знижується з 50 до 33,4 мм, маса активної частини знижується на 0,2 кг, а енергетичний фактор зростає від 0,42 до 0,56. Такі характеристики з'являються за умови застосування холоднокатаних, з великим вмістом кремнію, сталей і застосування активного коректору коефіцієнта потужності.

11. Реалізація розглянутих способів забезпечення енергозбереження в АЕП запропонована в якості лабораторних стендів науково-дослідних лабораторій «Енергозбереження в електроприводі» та «Технічних засобів автоматизації систем контролю і керування транспортних засобів», введених в експлуатацію в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова.

Основні наукові результати розділу опубліковано в [3, 20, 24, 31, 32, 35, 37, 41].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З МІНІМАЛЬНОЮ АПАРATНОЮ НАДМІРНІСТЮ ДЛЯ ЕЛЕКТРОРУШІЯ БАГАТОЦІЛЬОВОГО АПА

4.1 Сучасний стан, передумови розвитку та вимоги до безконтактних вентильних електроприводів

Асинхронні електроприводи з безконтактними двигунами постійного струму (БДПС, *BLDC*) зарубіжного виробництва (Японія, Китай, США, Західна Європа) знаходять широке застосування у вітчизняній авіації, медицині, різних галузях промисловості. Зауважимо, що більшість зарубіжних АЕП побудованих на базі БДПС, що серійно випускаються, орієнтовані на складні застосування. Це, наприклад, високоточні слідкуючі пристрої, верстати із числовим програмним управлінням, електромеханічні роботехнічні системи, де потрібен дуже високий діапазон регулювання швидкості, точне позиціонування або слідкуючі режими роботи. Завдяки цим вимогам такі АЕП мають дуже високі відпускні ціни. Так, АЕП фірми *Mitsubishi Electric MR-C10A-UE*, 100 Вт, 3000 об/хв з діапазоном регулювання швидкості $D = 1000$ у середині 2016 року відпускався на Україні за ціною майже 600 доларів США (приблизно 400 дол. – системний блок, 200 дол. – БДПС з вбудованим високорозрядним енкодером) [48, 231].

Незважаючи на високу вартість БДПС, такі його параметри, як надійність, високе значення конструктивного коефіцієнту C_m , швидкодія і прийомистість на низьких швидкостях, дозволяють вважати перспективним застосування АЕП з БДПС у спеціальній морській техніці [29, 49, 81, 86] вітчизняного виробництва. Таки конструкції вже є, наприклад, у експериментальних зразках АПА типу «Гідрограф», м. Миколаїв (табл. 4.1) [10, 38]. Якщо проаналізувати основні вимоги до АЕП для АПА аналогічного

типу, то можна побачити, що для забезпечення основних функцій АПА, достатньо мати діапазон регулювання швидкості $D = 3 \dots 15$ при точності її підтримки на нижніх діапазонах регулювання до 10 %. При цьому немає необхідності у більшості внутрішніх захистів, інтерфейсів, не потрібен високорозрядний енкодер.

Таблиця 4.1 – Деякі характеристики експериментального зразка АПА «Гідрограф» (м. Миколаїв) [10]

Показник	Значення
Маса апарата	65 кг
Потужність маршових двигунів, виконання	2×250 Вт, баророзвантажені
Діапазон робочих швидкостей апарата	0,25...2 м/с
Гідропропульсивний комплекс	Пряма передача
Діаметр гвинтів у насадці	250 мм
Швидкодія при ступінчатій зміні заданої швидкості	3 с
Точність підтримки швидкості горизонтального прямолінійного переміщення на нижній характеристиці діапазону регулювання	0,05 м/с
Максимальне перерегулювання швидкості	20 %

В Україні автоматизовані електроприводи з БДПС тільки починають вироблятися (ТОВ «Електротехніка – Нові Технології», м. Одеса), але їх схемотехнічна база до кінця ще не відпрацьована. Оскільки багатоцільові АПА гостро затребувані і так як серійне виробництво в Україні таких апаратів відсутнє, то створення на основі вітчизняної промислової бази АПА з простими і функціональними електромеханічними системами на основі БДПС є важливою і актуальною науково-технічною задачею, яка є складовою загальної проблеми синтезу АПА.

Відомо, що БДПС – синхронний двигун змінного струму, обмотки статора якого живляться від частотного перетворювача, комутуючого струми фаз у функції кутового положення ротора з обвідною частотою, яка дорівнює числу полюсів ротора, помноженою на кутову частоту обертання ротора. Для функціонування АЕП на основі БДПС у широкому діапазоні регулювання

швидкостей необхідні високоякісні (1000 і більш імпульсів на оборот), досить коштовні, датчики положення ротора (ДПР) – енкодери [85, 118].

Більш прості АЕП з БДПС використовують скалярні методи керування і, нерідко, експериментальні зразки БДПС виготовляють на базі серійних асинхронних двигунів, замінюючи короткозамкнений ротор, ротором з постійними висококоерцитівними магнітами, застосовуючи найбільш прості датчики положення ротора – на основі ефектів Холла, фотоелектричного або індукційного ефектів [179–184].

Традиційно, розробка та дослідження більшості сучасних АЕП здійснюється за допомогою координатних перетворень (КП). Відомо, що КП змінних справедливі, якщо виконуються основні припущення для узагальненої електричної машини: синусоїдальний розподіл магніторушійної сили (МРС) обмотки статора, при синусоїдальному живленні симетрично розподілені обмотки статора і ротора. Отже, для застосування КП при дослідженнях АЕП з БДПС і скалярним керуванням, формальні умови відсутні: відносно прості БДПС створюються з зосередженими обмотками і, так як обмотки статора живляться від джерела напруги прямокутної форми, їх МРС близька до прямокутної.

З метою підвищення конкурентоспроможності вбудованих електромеханічних систем керування АПА, створюваних на вітчизняній елементній базі, були проведені дослідження [10, 181], що дозволили, у результаті, відмовитися від векторного способу керування БДПС [182, 202]. Природно, застосування ДПР з низьким числом імпульсів на оборот [183] призводить до суттєвого зниження діапазону регулювання швидкості і підвищення пульсацій електромагнітного моменту. З огляду на інерційний «вентиляторний» характер навантаження пропульсивного комплексу [155] АПА, а також не дуже високі, за сучасними апаратними можливостями вимоги, до діапазону і точності підтримки швидкості, можна вважати, що існують резерви спрощення схемотехнічної бази побудови АЕП з БДПС для АПА.

Так як у БДПС, застосованому в експериментальних зразках АПА, обмотки симетрично розташовані на статорі, то при прямокутній формі живлячої напруги можна виділити основні гармоніки напруги і МРС.

Оскільки, для перших гармонік задовольняються допущення, прийняті в моделі узагальненої електричної машини, то, отже, справедливі й наступні координатні перетворення, а головні властивості та характеристики БДПС зі скалярним керуванням можна виявити на основі двофазних моделей.

Зазначений підхід нерідко використовується, наприклад, при аналізі роботи АД, що живляться від перетворювачів частоти. Відзначимо, що якщо умови симетрії для електричної машини виконані конструкційно і її живлення здійснюється від несинусоїдального джерела, то застосування координатних перетворень змінних буде адекватно реальним фізичним процесам тільки для квазістатичних динамічних режимів. У таких режимах швидкість і електромагнітний момент коливаються близько середніх значень, при цьому амплітуда, частота і форма коливань змінних будуть різні для дво- і трифазних описів АЕП.

Таким чином, побудова моделей АЕП з БДПС для електрорушіїв АПА і подальша технічна реалізація таких АЕП (при різних способах керування) можливі з використанням координатних перетворень диференціальних рівнянь, що описують БДПС при прийнятих припущеннях. Зрозуміло, що технічна реалізація АЕП повинна бути обґрунтована порівнянням режимів роботи БДПС з різними способами управління на характерне реактивне статичне навантаження, яке, як наголошено, для АПА має вентиляторний характер.

4.2 Синтез математичної моделі БДПС електрорушіїв АПА

У обертовій системі координат $d-q$ координатні перетворення для еквівалентів напруги симетричної обмотки статора БДПС зв'язані з фазними напругами двома системами рівнянь – (4.1) і (4.2). При переході від трифазної до двофазної системи координат $\{3/2\}$ справедливий запис:

$$\left. \begin{aligned} u_d(\tau) &= \frac{2}{3} [U_a(\tau) \sin(\omega_k \tau) + U_b(\tau) \sin\left(\omega_k \tau - \frac{2\pi}{3}\right) + U_c(\tau) \sin\left(\omega_k \tau + \frac{2\pi}{3}\right)]; \\ u_q(\tau) &= \frac{2}{3} [U_a(\tau) \cos(\omega_k \tau) + U_b(\tau) \cos\left(\omega_k \tau - \frac{2\pi}{3}\right) + U_c(\tau) \cos\left(\omega_k \tau + \frac{2\pi}{3}\right)]; \\ u_0(\tau) &= \frac{1}{3} [U_a(\tau) + U_b(\tau) + U_c(\tau)], \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

а при переході від двофазної до трифазної системи координат $\{2/3\}$:

$$\left. \begin{aligned} U_a(\tau) &= u_d(\tau) \sin(\omega_k \tau) + u_q(\tau) \cos(\omega_k \tau) + u_0(\tau); \\ U_b(\tau) &= u_d(\tau) \sin\left(\omega_k \tau - \frac{2\pi}{3}\right) + u_q(\tau) \cos\left(\omega_k \tau - \frac{2\pi}{3}\right) + u_0(\tau); \\ U_c(\tau) &= u_d(\tau) \sin\left(\omega_k \tau + \frac{2\pi}{3}\right) + u_q(\tau) \cos\left(\omega_k \tau + \frac{2\pi}{3}\right) + u_0(\tau), \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

де $U_a(\tau)$, $U_b(\tau)$ і $U_c(\tau)$ – фазні напруги трифазної системи; $u_d(\tau)$ і $u_q(\tau)$ – проекції фазних напруг на вісі системи координат $d-q$, що обертається з частотою ω_k ; $u_0(\tau)$ – вектор нульової послідовності, що дорівнює нулю при нульових початкових умовах і повної симетрії обмотки статора; $\Theta = \omega_k \tau$ – кутове положення вектора в системі координат $d-q$.

Підкреслимо, що і для інших змінних БДПС (струмів, МРС) координатні перетворення $\{3/2\}$ і $\{2/3\}$ справедливі. При векторному однозонному керуванні БДПС, в найбільш загальному випадку, проекції фазних напруг $u_d(\tau)$ і $u_q(\tau)$ формуються сигналами $u'_d(\tau)$ і $u'_q(\tau)$ високорозрядних ДПР в функції заданих від зовнішнього джерела за відповідними координатними осями напружень. Це формування здійснюється, наприклад, за допомогою синусно-косинусного обертового трансформатора (СКОТ) має невеликий власний час затримки τ_{Π} , причому геометричний кут установки ДПР орієнтований по осі d . Тоді:

$$\left. \begin{aligned} u'_d(\tau) &= u_d(\tau) \cos(\omega_k \tau_{\Pi}) - u_q(\tau) \sin(\omega_k \tau_{\Pi}); \\ u'_q(\tau) &= u_q(\tau) \cos(\omega_k \tau_{\Pi}) + u_d(\tau) \sin(\omega_k \tau_{\Pi}). \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Запишемо рівняння БДПС у системі координат $d-q$, що прив'язана до кутової частоти обертання ротора. Рівняння електричної рівноваги в операторній формі:

$$\left. \begin{aligned} u_d(s) &= R_s \cdot i_d(s) + L_d \cdot s \cdot i_d(s) - \omega_k(s) L_q \cdot i_q(s); \\ u_q(s) &= R_s \cdot i_q(s) + L_q \cdot s \cdot i_q(s) + \omega_k(s) L_d \cdot i_d(s) + \omega_k(s) \cdot \psi_B(s), \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

де R_s – опір фази статора; $i_d(s)$, $i_q(s)$ і $u_d(\tau)$ і $u_q(\tau)$ і L_d , L_q – відповідно, струми й індуктивності по осях координат $d-q$; $\psi_B(s) = \psi_B = \text{const}$ – потокозчеплення, яке визначається коерцитивною силою магнітів ротора.

Попередньо проведемо аналіз властивостей векторного однозонного АЕП з БДПС при одномасовому постійному навантаженні реактивного характеру і датчика положення ротора (ДПР), який функціонує на основі СКОТ (сінус-косінусного обертового трансформатора), тобто «ідеального» датчика положення. У цьому випадку, при $L_d = L_q$ рівняння руху АЕП і електромагнітного моменту будуть наступні:

$$M(s) - M_c(s) = J \cdot s \cdot \omega(s); \quad (4.5)$$

$$M(s) = \frac{m \cdot p_{\Pi}}{2} \cdot i_d(s) \cdot \psi_B, \quad (4.6)$$

де p_{Π} і m – число пар полюсів і число фаз БДПС; $\omega(s) = \omega_k(s) p_{\Pi}$ – кутова частота обертання ротора БДПС; J – момент інерції ротора БДПС.

Спрощена функціональна схема АЕП з БДПС, що функціонує на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) і використовує високорозрядні ДПР при живленні від промислової мережі зображена на рис. 4.1. Відзначимо, що саме на основі такої схеми створюється більшість АЕП зарубіжного виробництва для АПА.

Пропонується більш просте технічне рішення, яке, хоча і обмежує функціонально-технологічні можливості електропривода, проте дозволяє реалізувати його технічні характеристики відповідно до табл. 4.1.

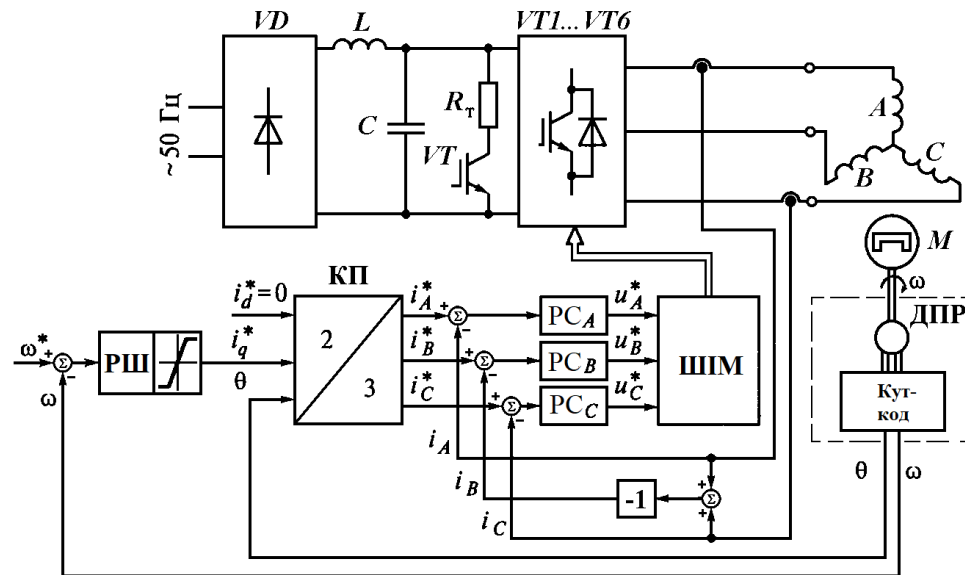


Рисунок 4.1 – Спрощена функціональна схема однозонного векторного АЕП для АПА на основі БДПС і високорозрядних ДПР

Спрощення пов'язано із виключенням високорозрядних ДПР, подальшою установкою більш простого ДПР [184], а також шляхом вилучення ШІМ і вузла координатних перетворень із системи керування.

4.3 Розробка електрорушії з мінімальною апаратною надмірністю електропривода для багатоцільового АПА

Розглянемо приклад побудови безконтактного вентильного електроприводу з мінімальною апаратною надмірністю для автономного плавального апарата загальною вагою 20 кг, який запускається «з рук». Для подальшого аналізу розглянемо роботу системи, побудованої на основі схеми, наведеної на рис. 4.1 при використанні експериментального зразка БДПС з висококоерцитівними самарій-кобальтовими магнітами виробництва ТОВ «Електротехніка – Нові Технології» (м. Одеса). Основні технічні параметри БДПС наведені в табл. 4.2.

На рис. 4.2, а наведена схема силової частини інвертора, а на рис. 4.2, б – функціональна схема ШІМ з розподільником імпульсів керування ключами інвертора.

Таблиця 4.2 – Основні параметри БДПС електрорушія малого АПА

Назва параметру, характеристика	Значення
Число полюсів	8
Число фаз	3
Номинальна напруга живлення, В	24
Номинальна частота обертання, рад/с	418,9
Номинальний момент, Н·м	0,041
Максимальний момент, Н·м	0,17
Номинальна потужність, Вт	17
Опір фази при 60 °С, Ом	1,2
Максимально-допустимий струм, А	6,4
Індуктивність фази, мГн	1,0
Момент інерції ротора, кг·м ²	1·10 ⁻⁴

Робота регулятора швидкості РШ і регуляторів струму РС відповідає відомими схемами. Координатний перетворювач КП описаний системою (4.1), БДПС і ДПР – рівняннями (4.2)–(4.6).

Результати моделювання процесу пуску з $M_c = 0,04$ Н·м і подальшого скидання навантаження в момент часу $\tau = 0,35$ с до значення $M_c = 0,015$ Н·м для АЕП, що відповідає схемі, наведеної на рис. 4.1 при частоті генератора G ШІМ 8 кГц і $\tau_{\pi} = 0,25 \cdot 10^{-3}$ с представлені на рис. 4.3.

Моделювання системи проводилося в середовищі *Matlab/Simulink*. із застосуванням бібліотеки *SPS*.

За допомогою координатних перетворень проведено моделювання електрорушія на основі БДПС у натуральних осях (для трифазної моделі) і враховані всі особливості, що вносяться у систему вищими гармоніками МРС і напруг.

У ході дослідження встановлено, що при збільшенні частоти ШІМ понад 20 кГц, зниженні часу τ_{π} на порядок і зменшенні петлі гістерезису елементів $DA1$ – $DA3$, можна отримати більш високий діапазон регулювання швидкості (при необхідності – 500 і більше) при практично нульових пульсаціях моменту.

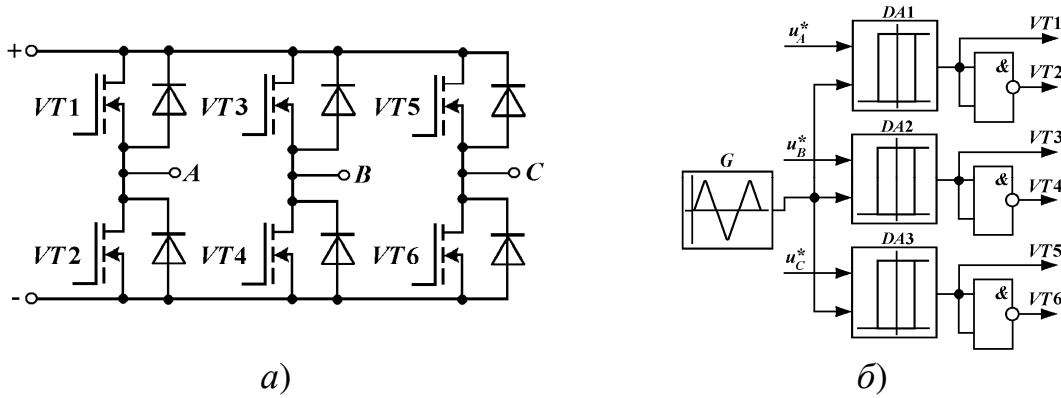


Рисунок 4.2 – Схема транзисторного інвертора (а) і ШІМ (генератор G , компаратори DA) з розподільником імпульсів на елементах «2 І-НЕ» (б)

Застосування досить складної програмно-апаратної бази електрорушії з БДПС за схемою, наведеною на рис. 4.1 (високорозрядні ДПР і мікропроцесор з програмною ШІМ, два гальванічно розділених датчика струму, три регулятора струму) різко збільшує вартість такого АЕП при надмірному для АПА діапазоні регулювання частоти обертання валу електродвигуна пропульсивного комплексу [157] АПА.

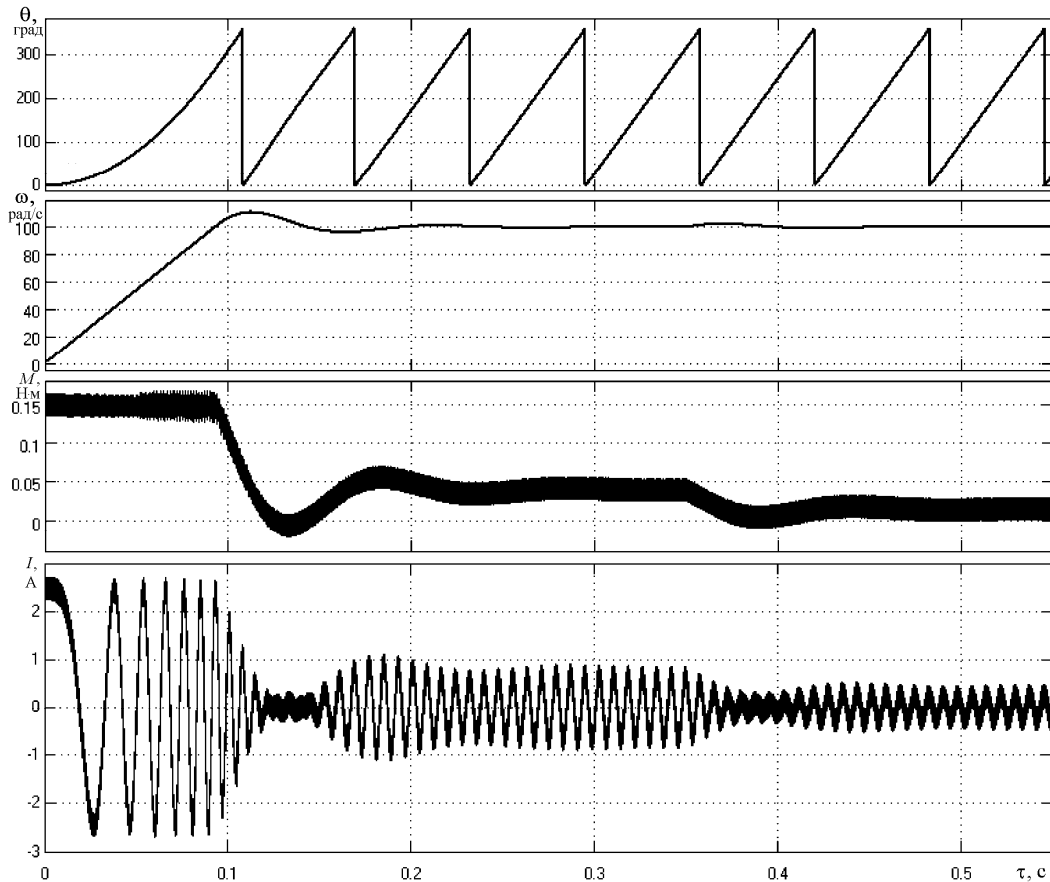


Рисунок 4.3 – Пуск електрорушії на основі БДПС (згідно зі схемою, наведеною на рис. 4.1) при номінальному M_c з подальшим скидом навантаження до 0,015 Н·м

схемою наведеною на рис. 4.4: а) очікуване зниження вартості конструкції 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 %.

Очевидно, що при пропонованому технічному рішенні пульсації моменту на валу двигуна зростуть, проте вартість технічної реалізації електрорушії АПА буде суттєво меншою.

2. Графіки формування на виході РІ логічних сигналів керування ключами інвертора $VT1, \dots, VT6$ (згідно рис. 4.2, а) у функції сигналів ДПР $VH1, VH2$ і $VH3$ у режимі 50 % коефіцієнта заповнення при сталій частоті обертання ротора наведені на рис. 4.5. Тут же показані графіки зміни електричного і механічного кутового положення восьмиполусного ротора БДПС.

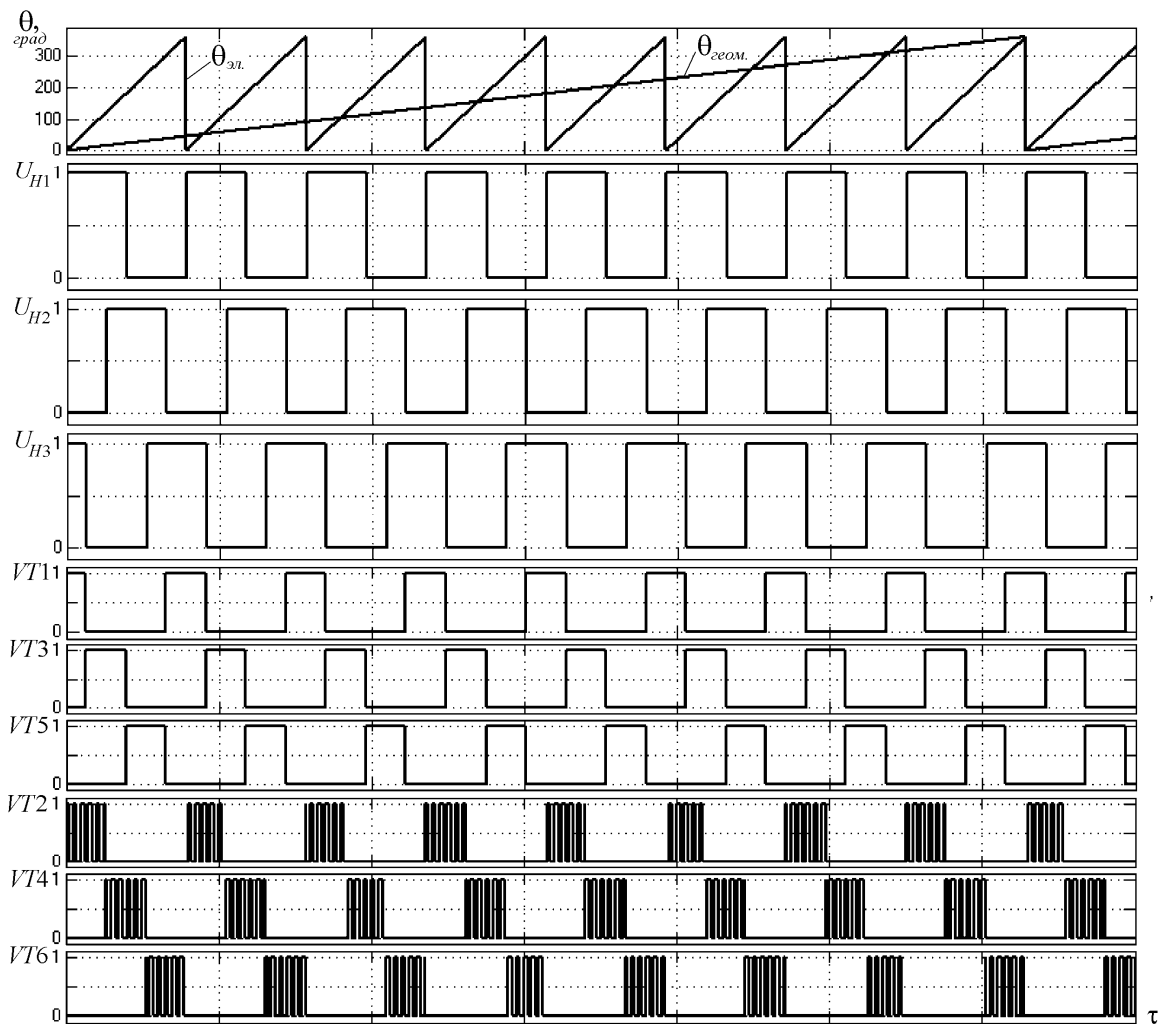


Рисунок 4.5 – Формування імпульсів керування ключами інвертора $VT1, \dots, VT6$ на виході РІ у функції сигналів ДПР ($VH1, VH2, VH3$) і зміна кутового положення Θ восьмиполусного ротора БДПС електрорушії АПА

На рис. 4.6 представлені результати моделювання процесів пуску АЕП з БДПС, згідно зі схемою, наведеною на рис. 4.4: 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 у цьому випадку може досягати $D \approx 30$, чого цілком достатньо для виконання будь-яких технологічних завдань АПА ПП. На рис. 4.7 додатково приведені графіки зміни струмів фаз БДПС при пуску на частоту обертання 100 рад/с, що підтверджують працездатність контуру регулювання струму з одним загальним датчиком струму.

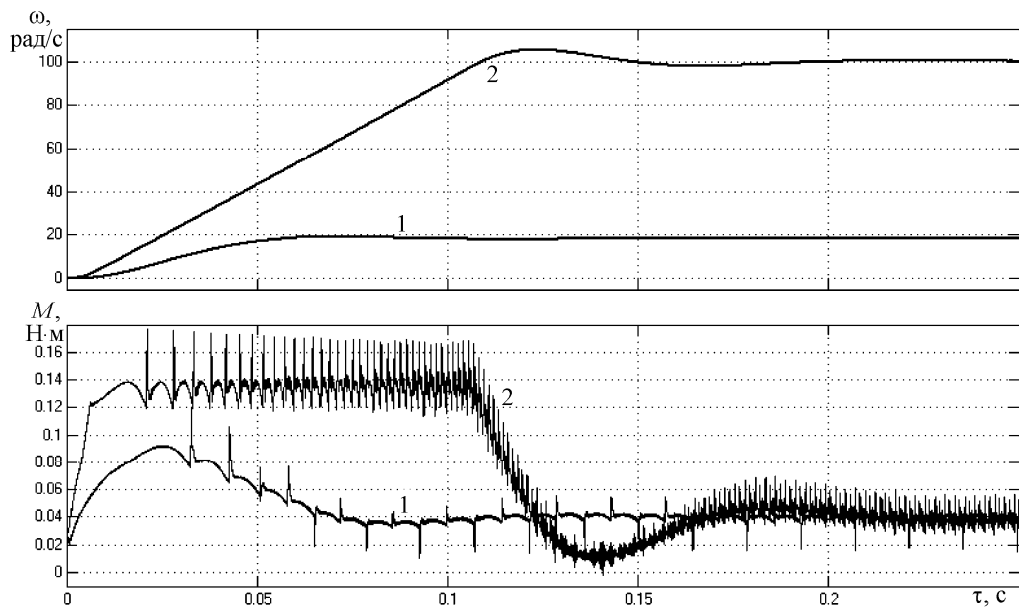


Рисунок 4.6 – Пуск АЕП з БДПС при $M_c = 0,015$ Н·м (згідно зі схемою, наведеною на рис. 4.4): 1 – на низьку частоту обертання (до струмообмеження); 2 – на велику частоту обертання (при струмообмеженні)

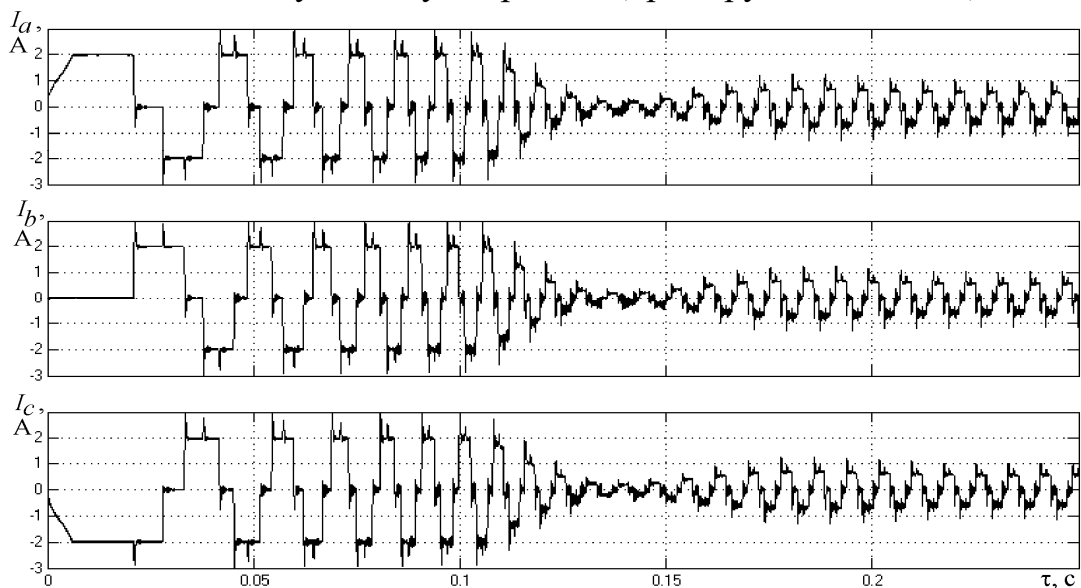


Рисунок 4.7 – Фазні струми БДПС при пуску у режимі струмообмеження

Графіки, наведені на рис. 4.6 і рис. 4.7 отримані при установці ДПР з кутом «випередження» $\Theta_{\text{вип}}$ на 45 ел. градусів, що було визначено після ряду модельних досліджень запропонованого АЕП з мінімальною апаратною надмірністю. Темп наростання швидкості обмежувався активним фільтром (АФ) другого порядку і допустимими для БДПС пульсаціями моменту.

Таким чином, якщо порівняти графіки пуску (рис. 4.3 і рис. 4.7) на частоту 100 рад/с двох електрорушіїв, що функціонують на основі рішень, наведених на рис. 4.1 і рис. 4.4, то можна переконатися лише у несуттєвих відмінностях у процесах зміни швидкості.

4.4 Синтез системи електроруху на базі БДПС багатocільового АПА

Вентильні безконтактні двигуни постійного струму зі збудженням від високоенергетичних рідкісноземельних постійних магнітів, наприклад, *Nd-Fe-B* (залізо-неодим-бор), найбільш перспективні з усіх типів традиційних електродвигунів для застосування у системах електроруху різних АПА [5, 39, 103, 105]. Використання термостабільних магнітів з легуючими і підвищуючими коерцитивної силу добавками з матеріалу *Nd-Fe-B* у системі збудження БДПС дозволяє зберегти працездатність магнітів при нагріванні до +170 °С і помітно поліпшити експлуатаційні властивості всієї системи електроруху. Крім того, при застосуванні електропривода на основі БДПС у АПА проявляється цілий комплекс позитивних конструктивно-технологічних властивостей і техніко-експлуатаційних переваг:

- відсутність вимагаючих обслуговування механічних вузлів суттєво підвищує надійність і ресурс БДПС, що входить до складу системи електроруху АПА (у порівнянні з щітковими електродвигунами постійного струму і асинхронними з явно вираженою обмоткою на роторі);

- висока перевантажувальна здатність вентильного БДПС (максимальний короткочасний момент може перевищувати тривалий момент в 4–8 разів), що дозволяє АПА отримати відмінну маневреність;

– досить низьке значення струму холостого ходу і найвищі з усіх двигунів малої потужності енергетичні показники (ККД більше 0,9 при слабкій його залежності від коефіцієнта завантаження) дозволяє АПА підвищити час його автономної роботи;

– при необхідності БДПС може забезпечити дуже високий діапазон регулювання частоти обертання ($1:10^3$ і більше) гребного гвинта або інших виконавчих механізмів АПА;

– можливість побудови більш простої (і тому більш дешевої у виробництві) системи керування для системи електроруху АПА у порівнянні з частотно-регульованим асинхронним електроприводом;

– через низький перегрів у вентильних БДПС помітно збільшується ресурс ізоляції, що також дозволяє роботу з суттєвими перевантаженнями, необхідними, наприклад, при екстремому маневруванні АПА;

– найкращі масогабаритні показники, значний термін служби, високе напрацювання на відмову (понад 10^4 год.), можливість оптимізації режимів роботи шляхом формування рівнів обмеження моменту і швидкісних діаграм, також розширюють тактико-технічні і експлуатаційні характеристики АПА.

Потрібно відзначити, що останніми роками вентильні БДПС і електроприводи на їх основі активно виробляються провідними зарубіжними електротехнічними компаніями (*Siemens, General Electric, Bosch, Schneider Electric, Fanuk, ABB* тощо) [51, 118, 121]. Виготовляють БДПС і в Росії (ВАТ «ЧЕАЗ», м. Чебоксари), налагоджується їх дрібносерійне виробництво і в Україні (ТОВ «Електротехніка – Нові технології», м. Одеса). Основний стримуючий фактор широкого застосування електроприводів на основі БДПС – ціна перетворювача і наявність дорогого високорозрядного датчика положення ротора (ДПР, в зарубіжних джерелах – *Shaft Position Sensor* або *Shaft Encoder*), наявність розширених сервісно-діагностичних і захисних функцій, ряду інших вбудованих систем. Однак для застосування у багатоцільових АПА ці чинники виявляються несуттєвими, зокрема через те, що є можливості помітного спрощення системи керування [19, 255], застосування найпростіших ДПР [181],

проводиться незалежно і послідовно – від внутрішнього контуру до зовнішнього, із забезпеченням відповідної незалежної корекції у кожному контурі, а передатна функція (ПФ) кожного регулятора визначається видом логарифмічної амплітудно- частотної характеристики (ЛАЧХ) розімкнутого контуру регулювання і ПФ об'єкта. Стосовно до двоконтурного вентильного електропривода (рис. 4.8), СПРК містить основний контур регулювання швидкості гребного гвинта і внутрішній, підлеглий зовнішньому, контур регулювання струму БДПС.

Контур регулювання струму складається зі: *a)* релейного регулятора струму, функції якого закладені у нуль-органі НОЗ; *б)* модулятора (блок «Розподільник імпульсів – модулятор») і драйвер керування ключами IR2130; *в)* об'єкта регулювання – трифазного мостового інвертора і силового ланцюга БДПС; *г)* зворотного зв'язку – датчика струму на резисторі R_s і формувача-підсилювача модуля сигналу (ФМС2).

У контур регулювання швидкості входять: *a)* регулятор швидкості (РШ) пропорційно-інтегрального типу; *б)* об'єкт регулювання – замкнений контур регулювання струму і механічна частина системи електроруху; *в)* датчик зворотного зв'язку – безконтактний тахогенератор (БТГ) і ДПР [19].

Нехай на вхід регулятора швидкості надходить зовнішній (по акустичному або радіоканалу, від бортової системи штучного інтелекту, програми керування і т. д.) сигнал завдання швидкості $U_{зш} > 0$ (для руху «Уперед»), а швидкість гвинта АПА при цьому менше заданої і сигнал на виході регулятора швидкості (сигнал завдання контуру регулювання струму якоря) позитивний:

$$U_{зс} = U_{зш} - U_{зз} > 0.$$

Модуль сигналу завдання струму визначить необхідне значення струму БДПС:

$$i = \text{abs}(U_{зс}) / k_{зс},$$

де $k_{зс}$ – коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку за струмом. Знак сигналу $U_{зс}$ визначає режим роботи електропривода (якщо $U_{зш} \cdot U_{зс} > 0$, то режим руховий, якщо $U_{зш} \cdot U_{зс} < 0$, то режим гальмування).

При заданих умовах ($U_{\text{зш}} > 0$ і $\omega < \omega_3$) на виході НО1 буде логічна «1», а на виході НО2 – логічний «0». Ці сигнали, спільно із сигналами датчика положення ротора (Д1, Д2 і Д3), надходять на пристрій розподілу імпульсів «Розподільник імпульсів – модулятор» (РІМ). За цими сигналами РІМ визначає таку комбінацію включення транзисторних ключів інвертора, яка повинна існувати лише при даному просторовому положенні ротора – для регулювання струму у режимах двигуна або електромагнітного гальмування (в описаних умовах – режим двигуна).

Сигнал $U_{\text{зс}}$ подається на формувач модулю сигналу ФМС1 і на вході нуль-органу НО3 порівнюється з від'ємним значенням модулю сигналу зворотного зв'язку за струмом, що знімається з ФМС2.

Якщо у фазах обмоток БДПС струм менше заданого, тобто

$$\text{abs}(U_{\text{зс}}) - \text{abs}(U_{\text{ос}}) > 0,$$

то на виході НО3 встановиться логічна «1», що дозволяє включення двох транзисторів інвертора (режим Р2). Це призводить до збільшення струму і, відповідно, моменту і швидкості.

У іншому випадку, при логічному «0» на виході НО3, на виході елементів модулятора буде високий рівень сигналу. Виконується режим Р0 з виключенням всіх транзисторів, струм при цьому зменшується. Ширина петлі гістерезису НО3 визначає розмах пульсацій струму Δi та частоту комутації ключів.

ФМС1 і ФМС2 призначені для створення умов роботи контуру струму електропривода, незалежно від знаків сигналів $U_{\text{зс}}$ і U_{R_s} . Формувачі модуля сигналу (ФМС1 і ФМС2) представляють собою випрямлячі на операційних підсилювачах (ОП). Робота такого випрямляча ґрунтується на тому, що при одній полярності вхідна напруга, з деяким масштабним коефіцієнтом, подається на вихід, а при іншій полярності – вихідний сигнал інвертується з тим же масштабним коефіцієнтом посилення. Узгодження рівнів сигналів $U_{\text{зс}}$ і $U_{\text{ос}}$ здійснюється регулювальним резистором, що встановлений на виході регулятора швидкості (на схемі рис. 4.8 не показаний).

У силовій частині інвертора застосовуються керовані напругою транзисторні ключі з ізольованими затворами. Керування ключами здійснюється за допомогою недорогий спеціалізованої мікросхеми, наприклад, драйвера *IR2130*.

Основні необхідні характеристики драйвера задовольняють вимогам до сучасних цифрових систем електроруку: однокристальне виконання; безпосередній інтерфейс з усіма рівнями вхідних сигналів; вбудована пауза між імпульсами; захист від струмового перевантаження; допустимий діапазон напруги живлення до 600 В. Можливі для установки і інші типи драйверів керування транзисторними ключами, але у будь-якому випадку застосований драйвер повинен мати наступні характеристики.

1. Вихідні сигнали з амплітудою у діапазоні від 10 до 15 В.
2. Малий опір керуючого каскаду (для швидкого заряду й розряду ємності затвора).
3. Плаваючий вихідний сигнал (для забезпечення керування верхніми транзисторними ключами).

Крім цих вимог, драйвер повинен бути здатний управляти комбінаціями включення ключів.

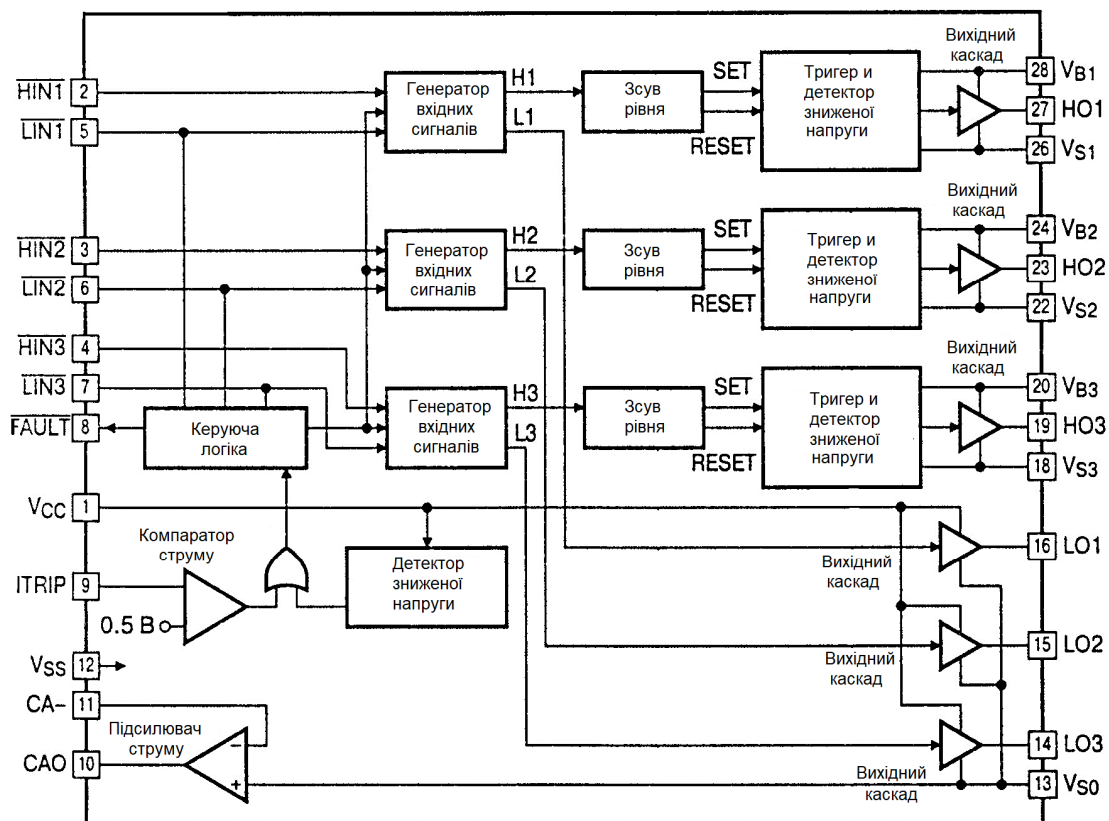
Функціональна схема драйвера *IR2130* і типова схема його застосування для керування високовольтними ключами інвертора наведені на рис. 4.9, *a* і *б*, призначення та позначення виводів – у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Призначення і позначення висновків драйвера

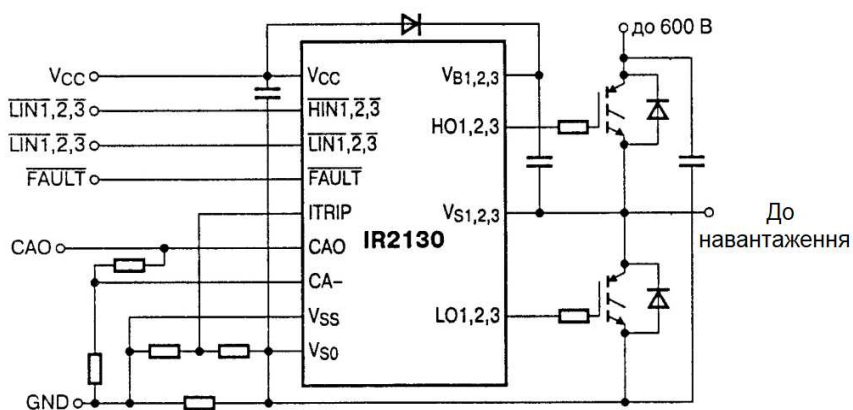
Позначка	Призначення
1	2
$\overline{HN1}, \overline{2}, \overline{3}$	Логічні виходи верхніх каналів
$\overline{UN1}, \overline{2}, \overline{3}$	Логічні виходи нижніх каналів
\overline{FAULT}	Вивід ідентифікації спрацьовування захисту від струмового перевантаження або зниженої напруги живлення нижніх каналів
V_{cc}	Напруга живлення логічних вузлів і ланцюгів нижніх каналів
I_{TRIP}	Вхід блокування при перевантаженні по струму
CAO	Вихід підсилювача струму
CA-	Інвертуючий вхід підсилювача струму

Продовження таблиці 4.3

V_{SS}	Логічна земля
$V_{B1,2,3}$	Виводи живлення верхніх каналів
HO1, 2, 3	Виводи підключення затворів транзисторів верхніх каналів
$V_{S1,2,3}$	Виводи підключення витоків транзисторів нижніх каналів
LO1, 2, 3	Виводи підключення затворів транзисторів нижніх каналів
V_{S0}	Силова земля
n. c.	Не використовується



а)



б)

Рисунок 4.9 – Функціональна схема (а) драйвера IR2130 і типова схема (б) його застосування

Так, мікросхема *IR2130* (рис. 4.9, б) містить шість вихідних каскадів, на входи яких подаються сигнали від трьох генераторів, кожний із яких працює на два виходи. Три нижніх вихідних каскади драйвера керуються безпосередньо генераторами сигналів *L1*, *L2* і *L3*, а сигнали керування верхніми ключами *H1*, *H2* і *H3* повинні бути зміщені по рівню перед подачею на верхні вихідні драйвери.

4.4.2. Моделювання вентильного електропривода на основі БДПС з мінімальною апаратною надмірністю для системи електроруху багатоцільового АПА

Вентильний електропривод електрорушії АПА являє собою синергетичне об'єднання у складі електромеханічної системи синхронного електричного двигуна зі збудженням від постійних магнітів, навантаження і електронного комутатора з системою живлення. Оскільки керування ключами мостового інвертора здійснюється командами від ДПР, то таким чином реалізується жорсткий зворотний зв'язок за просторовим положенням ротора, що і визначає алгоритм підключення обмоток БДПС до джерела постійного струму. Щітково-колекторний пристрій, по суті, є механічним комутатором, а його аналог у БДПС – електронний комутатор. Саме ця властивість дозволяє провести аналогію між моделлю вентильного електропривода на основі БДПС і моделлю класичного щіткового електродвигуна постійного струму, у якого секції обмотки якоря за допомогою щітково-колекторного пристрою підключаються до джерела постійної напруги. Потрібно підкреслити, що синергетичне об'єднання у складі електропривода названих компонентів впливає на роботу один одного. Тому найпростіша аналогія між електромеханічним перетворювачем і керованим інвертором може скласти основну особливість моделювання електропривода з вентильним БДПС [19]. Однак, для побудови замкнутої системи керування АПА, модель [19] може виявитися надмірною, оскільки враховує всі електромагнітні процеси та процеси перемикання (ДПР,

ключів, логічних елементів), що різко обмежує швидкість розрахунків, особливо – багатоваріантних, оптимізаційних.

Звернемо увагу на деякі фрагменти пропонованої спрощеної моделі, що представляють взаємодію перетворювачів енергії та керуючої інформації. По-перше, збудження від постійних магнітів дозволяє спростити модель еквівалентної обмотки збудження БДПС у порівнянні з моделлю синхронної електричної машини з електромагнітним збудженням – достатньо представити обмотку збудження як незалежне джерело ЕРС з власним внутрішнім опором. Тоді ЕРС, що наводяться у фазах БДПС, не міститимуть складових, пропорційних похідної струму за часом, що протікає у еквівалентній обмотці збудження. По-друге, в моделі вентильного електропривода на основі БДПС легко передбачити можливість зміни частоти обертання у широких межах. Тому обов'язковим є включення до складу моделі механічної підсистеми, що дозволяє визначати миттєву частоту обертання ротора електродвигуна. Передача частоти обертання у допоміжну схему, яка здійснює інтегрування, робить можливим отримання інформації про стан ротора у кожен момент часу (моделювання роботи ДПП). Зрозуміло, що структурне уявлення електрорушії, з урахуванням прийнятих припущень і спрощень дозволяє легко реалізувати, наприклад, засобами *Matlab/Simulink*, його математичну модель.

Структурна схема, з елементами принципової схеми, системи керування швидкістю БДПС електропривода електрорушії наведена на рис. 4.10. Відзначимо, що налаштування системи починають з внутрішнього контуру, вихідна координата якого (струм якоря) змінюється набагато швидше вихідної координати зовнішнього контуру – швидкості.

Вихідними при налаштуванні є вимоги до статичних і динамічних властивостей контурів і системи: відсутність статичної помилки у статичному режимі при стрибкоподібному відпрацюванні навантаження, зміни режимів швидкості (стрибком задаючого сигналу) з перерегулюванням, що не перевищує 5 %. Можливі й інші спеціальні вимоги до режимів роботи електрорушії АПА.

Основне призначення контуру струму вентиального електропривода складається у стабілізації струму якоря на заданому рівні. У транзисторному вентиальному електроприводі послідовна корекція контуру струму не потрібна, тому що контур струму є практично безінерційним з наступних причин.

По-перше, напруга джерела живлення U_d набагато перевищує ЕРС самоіндукції двигуна, що дозволяє форсувати процеси наростання і спаду струму I в діапазоні його обмеження (від $-I_{\max}$ до $+I_{\max}$) за час, набагато менший сумарної електромагнітної сталої часу T_e . При цьому, стала часу T_e і зворотний зв'язок за ЕРС двигуна не надають практичного впливу на динаміку електрорушії.

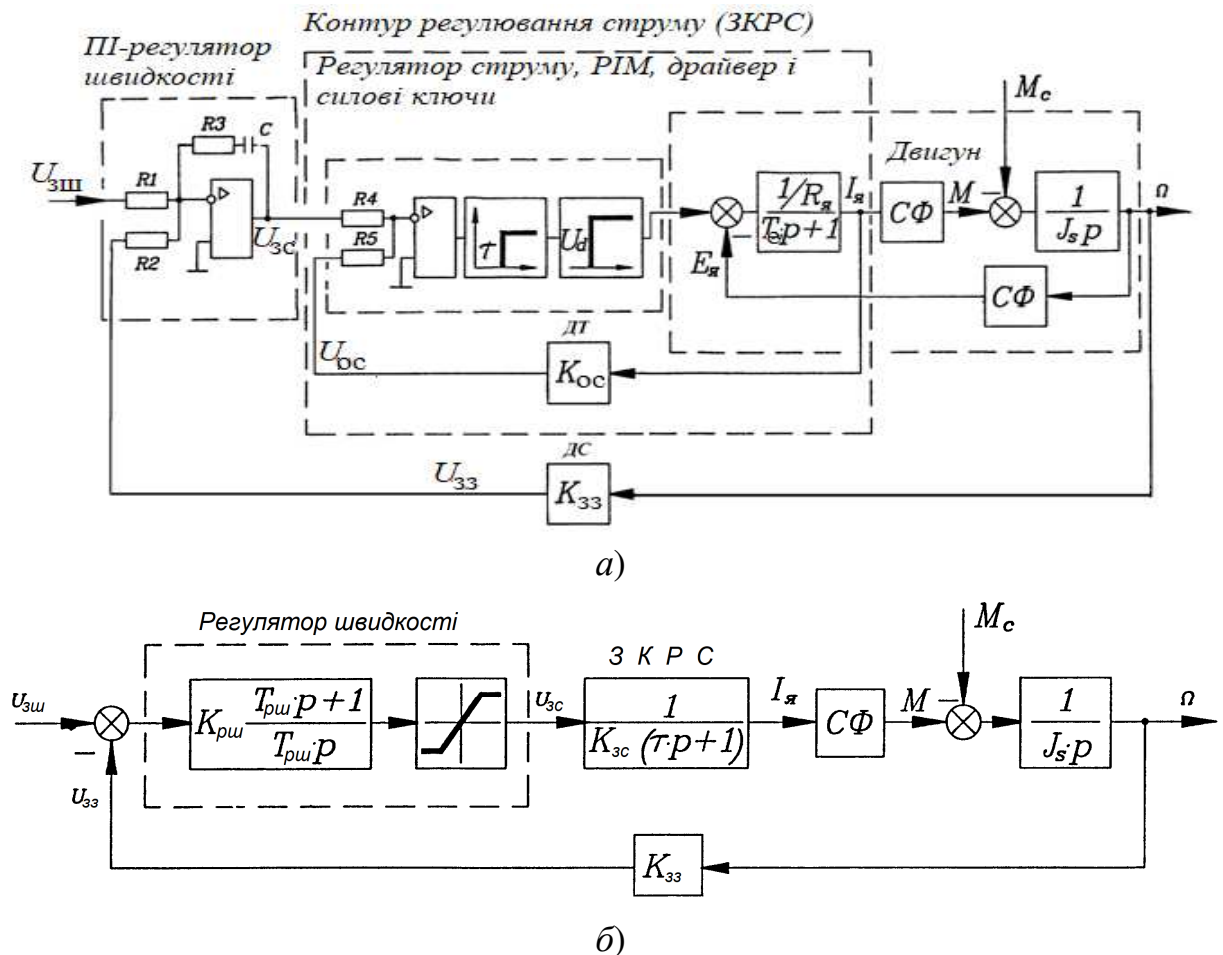


Рисунок 4.10 – Структурна схема, з елементами принципової (а), спрощеної системи керування швидкістю (б) електрорушії АПА

По-друге, регулятор струму, датчик струму і блок силових ключів конструктивно виконані практично безінерційними. Тому, при моделюванні, замкнутий контур регулювання струму можна наближено представити

аперіодичною ланкою зі сталою часу $\tau = 1$ мс і статичним коефіцієнтом передачі ланки $K_c = 1/K_{zc}$. Перетворимо ПФ замкнутого контуру регулювання струму (ЗКРС): $W(p) = \frac{1}{K_{zc}} \cdot \frac{1}{\tau p + 1} = \frac{1}{K_{zc}} \cdot \frac{1/\tau p}{1 + 1/\tau p}$.

Отриманий вираз слід трактувати як ПФ ланцюга, що складається з послідовно з'єднаних пропорційної ланки з коефіцієнтом $K_{pc} = 1/K_{zc}$ і інтегруючої ланки, зі сталою часу τ , при цьому інтегруюча ланка охоплена негативним зворотним зв'язком ланкою з одиничним коефіцієнтом передачі.

При настройці контуру регулювання швидкості перевагу віддано оптимізації контуру швидкості, що легко практично реалізовується, а «оптимізована» ПФ функція розімкнутого контуру швидкості набирає вигляду

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{1}{2\tau p \cdot (\tau p + 1)},$$

і на частоті зрізу $\omega_{зр} = 0,5\tau$ ЛАЧХ забезпечує запас за

фазою у 63,5 град. Тоді ПФ «оптимізованої» замкнутої системи буде

$$\text{описуватися наступним виразом: } W_{\text{зкш}}(p) = \frac{1}{K_{зз}} \cdot \frac{1}{2\tau p \cdot (\tau p + 1) + 1}.$$

Перехідні процеси у такій системі зв'язані з характеристичним рівнянням $2\tau p \cdot (\tau p + 1) + 1 = 0$, у якого показник демпфірування $\rho = 0,707$. Розглянута настройка контуру – настройка на модульний або технічний оптимум, що забезпечує перерегулювання 4,3 % і час регулювання до $4,7\tau$. Якщо підвищити показник демпфірування, то перехідний процес протікає більш монотонно і час регулювання несуттєво збільшується. Зі зменшенням показника демпфірування збільшуються коливальність і перерегулювання. Тому, для отримання настройки на модульний оптимум регулятор швидкості повинен мати ПФ, яка

$$\text{визначається виразом } W_{\text{рш}}(p) = K_{\text{рш}} = \frac{K_{zc} \cdot J_s}{K_{зз} \cdot c\Phi \cdot 2\tau}.$$

Регулятор швидкості – безінерційна ланка з коефіцієнтом передачі $K_{\text{рш}}$. У цьому випадку система буде мати статичну помилку регулювання швидкості. При великому діапазоні регулювання і у тих випадках, коли система з П-регулятором не забезпечує необхідної жорсткості механічних характеристик,

застосовують ПІ-регулятор швидкості, при якому система стане статичною. Для отримання астатизму за збуренням настройку контуру швидкості виконують на «симетричний» оптимум (через симетричного виду ЛАЧХ розімкнутого контуру регулювання швидкості). Тут передавальна функція ПІ-регулятора швидкості визначається виразом $W_{рш}(p) = K_{рш} \cdot \frac{1 + T_{рш}p}{T_{рш}p} = K_{рш} \cdot \frac{1 + 4\tau p}{4\tau p}$.

У структурну схему запропонованої моделі на виході ПІ-регулятора швидкості вводиться ланка з характеристикою «Обмеження», що відображає можливість виходу на режим струмообмеження у перехідних режимах або при перевантаженні гвинта електрорушії (див. рис. 4.11).

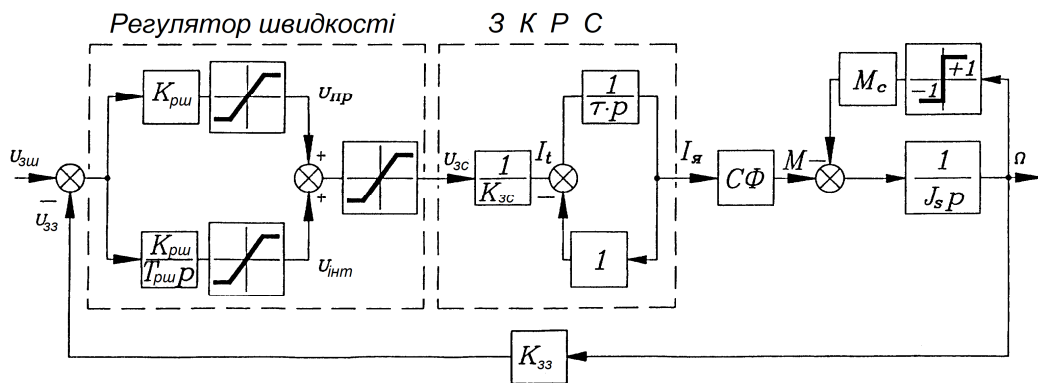


Рисунок 4.11 – Структурна схема системи керування швидкістю АПА із електрорушієм на основі БДПС і урахуванням обмежень

Облік можливості входження регулятора швидкості у режим насичення ведеться включенням ланок «обмеження» окремо, як за каналами пропорційної і інтегральної складової, так і за їх результируючою дією.

Напруга на виході ПІ-регулятора швидкості (сигнал $U_{зс}$ завдання контуру струму) визначається виразом:

$$U_{зс} = (U_{зш} - U_{зз}) \cdot K_{рш} (1 + 1/(T_{рш}p)) = U_{пр} + U_{інт},$$

де $U_{пр} = (U_{зш} - U_{зз}) \cdot K_{рш}$ і $U_{інт} = (U_{зш} - U_{зз}) \cdot K_{рш} / (T_{рш}p)$ – пропорційна і інтегральна складові вихідного сигналу регулятора швидкості.

Напрямок прикладення моменту сухого тертя M_c залежить від напрямку обертання гвинта АПА: $M_c = \text{mod} \cdot [M_c] \cdot \text{sign}(\omega)$, де $\text{sign}(\omega)$ – математична сігнум-функція, що дорівнює «+1» при $\omega > 0$, 0 при $\omega = 0$ і «-1» при $\omega < 0$.

На рис. 4.11 виразу для статичного моменту опору M_c відповідає включення ланцюга зворотного зв'язку, що охоплює ланку механічної частини електродвигуна.

Для настройки необхідно знати конструктивну постійну $c\Phi$ БДПС, струм якоря $I_{до}$ і опір обмотки $R_{лін}$ (включених послідовно двох фаз). Ці дані з достатнім наближенням отримуємо розрахунковим способом, використовуючи номінальні дані: $U_{dном}$ – номінальну напругу джерела постійного струму, при якому визначаються характеристики двигуна; $M_{до}$ – тривало-допустимий момент при швидкості близької до нульової, наприклад, 1 об/хв. Розрахунок проводимо за наступними формулами.

Конструктивний коефіцієнт двигуна: $c\Phi = 0,9 \cdot U_{dном} / \omega_{max}$. Тривало-допустимий струм: $I_{до} = 1,05 \cdot M_{до} / c\Phi$. Опір двох послідовно з'єднаних фаз двигуна: $R_{лін} = 0,1 \cdot U_{dном} / I_{до}$.

Нехай для БДПС відомі паспортні параметри: $U_{dном} = 300$ В, $n_{max} = 2000$ об/хв ($\omega_{max} = 209,4$ рад/с), $M_{до} = 13$ Н·м.

Звідси $c\Phi = 0,9 \cdot 300 / 209,4 = 1,29$ В·с/рад, $I_{до} = 1,05 \cdot 13 / 1,29 = 10,6$ А, $R_{лін} = 0,1 \cdot 300 / 10,6 = 2,83$ Ом.

При дослідженні динамічних властивостей АПА розраховуються процеси пуску і гальмування при змінах завдання сигналу швидкості $U_{зш}$: а) стрибкоподібний сигнал $U_{зш} = 5$ В, б) сигнал завдання такої ж амплітуди, але із застосуванням задавача інтенсивності (ЗІ). Задавач інтенсивності – собою електронний пристрій, що формує на своєму виході лінійно наростаючий/спадаючий сигнал завдання швидкості $U_{зш}$ при стрибкоподібному вхідному сигналі, тобто задає необхідний темп розгону чи гальмування АПА. Основне призначення ЗІ – обмеження моменту на валу електрорушії при змінах режиму (розгін, гальмування, реверс).

У ході розрахунків і аналізу динаміки, також, необхідно оцінити вплив настройки ПІ-регулятора швидкості на величину перерегулювання, час перехідних процесів пуску і гальмування електропривода.

4.5 Висновки до розділу 4

1. На основі аналізу властивостей і основних характеристик БДПС, показано, що вони найбільш ефективні для застосування в різних системах стабілізації і керування АПА, і зокрема, у системах електроруху цих апаратів.

2. На основі аналізу заданих технічних характеристик електрорушії АПА, побудованого на основі БДПС («вентиляторний» характер навантаження, діапазон регулювання швидкості 1...10 при допустимому перерегулюванні до 20 %), показана можливість реалізації електрорушії із мінімальною апаратною надмірністю – за рахунок обґрунтованої відмови від ШІМ модуляції і векторного керування з високорозрядним енкодером. Саме це приводить до зменшення ціни і підвищенню надійності електрорушії.

3. Запропоновано функціонально-структурну схему електрорушії на основі БДПС і простий варіант її технічної реалізації (до рівня принципів схем), що використовує принципи підпорядкованого регулювання координат при мінімальному числі комплектуючих і елементів.

4. Виконане математичне моделювання запропонованої схеми електрорушії підтверджує працездатність запропонованих рішень, можливість технічної реалізації при забезпеченні необхідних статичних і динамічних характеристик із максимальним діапазоном регулювання швидкості АПА 1...30, рівні пульсацій моменту електрорушії до 10 % в умовах інерційного навантаження системи «двигун-редуктор-гвинт», порівнянного із моментом інерції застосованого двигуна.

5. Запропонована спрощена структурна математична модель системи електроруху на основі БДПС, що дозволяє синтезувати регулятори контурів струму і швидкості, і, у подальшому, ефективно здійснити синтез всієї системи електроруху АПА. Показана послідовність розрахунку контурів регулювання, вибору силових ключів, драйвера керування.

6. Очікуване зниження вартості конструкції електрорушії на основі БДПС, виконаного із мінімальною апаратною надмірністю та за

запропонованою схемою, в умовах дрібносерійного виробництва складе 18...25 %, при одночасному зменшенні масогабаритних показників плати керування на 5...7 % від базових варіантів конструктивних рішень.

Основні наукові результати розділу опубліковані у [5, 10, 19, 29, 38, 39].

РОЗДІЛ 5

СИНТЕЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ АСК КУРСОМ БАГАТОЦІЛЬОВОГО АПА

5.1 Синтез математичних моделей системи електроруху багатоцільового АПА і її маршового двигуна як об'єктів керування

В даний час для проектування автономних плавальних апаратів з необхідними параметрами використовують різні підходи, які часто носять емпіричний характер [40, 140]. Для розробки досконалих керованих АПА будують складні дослідні установки, проводять безліч вимірів, для обробки даних залучають кваліфікований персонал, експертів – все це вимагає суттєвих фінансових витрат. Таких недоліків позбавлений математичний підхід до вирішення цієї проблеми, безумовно, з обмеженнями.

Метод математичного моделювання є найбільш поширеним методом дослідження морських рухомих об'єктів, оскільки відрізняється високою точністю і практично необмеженими можливостями при урахуванні нелінійностей будь-якого характеру. Дослідження, проведені за допомогою математичної моделі, нерідко називають експериментом на моделі [42, 61, 174].

Аналіз публікацій, присвячених розробкам математичних моделей керованого руху АПА [46, 61, 196], показує, що ця проблема не втратила своєї актуальності до теперішнього часу. Однак, з практичної точки зору, в сучасних умовах, завдяки розвитку обчислювальної техніки, програмного забезпечення, методів математичного опису, доцільно не розробляти нову, а вибирати з наявних моделей ту, яка задовольняє вимогам задачі, що розв'язується.

Математичне моделювання керованого руху АПА може бути представлено сукупністю інформаційних, електромеханічних і гідромеханічних систем, як складових об'єкта керування, взаємодіючих між собою:

– інформаційна система (ІС) – сенсори (кутів, швидкостей руху тощо) просторового положення АПА і його динамічних характеристик (далі нехтуємо похибками сенсорів і вважаємо їх ідеальними вимірювачами);

– автоматизована система керування (АСК) рухом, де здійснюється обробка інформації, що надходить від сенсорів, і обчислюються керуючі сигнали для виконавчих механізмів АПА (рушійних комплексів, допоміжних систем); конкретна модель АСК повинна будуватися відповідно до виду реальної АСК (аналогової, цифрової, нечіткої, нейромережевої);

– електрорушійний пристрій (ЕРП), до особливостей математичного моделювання якого можна віднести необхідність врахування додаткових втрат механічної енергії двигунів через їх роботу у середовищі рідкого діелектрика і коректного моделювання нелінійних характеристик гребних гвинтів на всьому діапазоні їх кутової швидкості, як суттєво нелінійних гідродинамічних об'єктів;

– корпус АПА вважаємо як тверде тіло, що рухається у воді під дією упорів рушіїв і піддається впливу сил гідродинамічного опору з урахуванням приєднаних мас води у динамічних режимах; на корпус АПА діють також сили зовнішніх збурень; корпус АПА може міняти свої експлуатаційні параметри при роботі під водою (масу і коефіцієнти гідродинамічного опору).

При розробці математичних моделей елементів АПА прийняті наступні загальні припущення, які не спотворюють фізики явищ, що протікають в об'єкті дослідження: вода, як робоче середовище, розглядається як ідеальна незбурена рідина; для кожного ступеня свободи руху АПА є відповідний рушійний пристрій (електродвигун); вектори тяги рушіїв і сили зовнішніх збурень прикладаються до центру мас АПА і не створюють діфферент і крен; насиченням магнітопроводів електродвигунів і нелійними залежностями механічних елементів нехтуємо; АПА у воді має нульову плавучість.

Поведінка руху АПА розглянемо відповідно до законів механіки руху твердого тіла у тривимірному просторі, що має шість ступенів свободи. Три з них характеризують лінійні переміщення центру мас і три – обертання об'єкта щодо центру мас. Кожному ступеню свободи відповідає одна швидкісна координата, якою виступає проекція вектора лінійної або кутової швидкості на відповідну вісь прийнятої координатної системи.

Миттєві значення швидкостей руху твердого тіла підкоряються теоремам про зміну кількості руху та моменту кількості руху, які в нерухомій системі координат мають вигляд

$$d\bar{K} / dt = \bar{R}; \quad d\bar{L} / dt = \bar{M}, \quad (5.1)$$

де \bar{K} – головний вектор кількості руху АПА; \bar{L} – головний вектор моменту кількості руху відносно початку координатної системи; \bar{R} – головний вектор зовнішніх сил, що діють на АПА; \bar{M} – головний момент зовнішніх сил відносно початку координат.

Проте рівняння руху АПА записують, зазвичай, у системі координат, жорстко пов'язаній з корпусом. Це пояснюється тим, що сили та моменти взаємодії корпусу АПА з навколишнім середовищем, а також сили та моменти зовнішніх дій найпростіше виражаються у зв'язаній системі координат. Оскільки точка O – початок зв'язаної системи координат $Oxyz$ – рухається з деякою лінійною швидкістю ϑ і АПА обертається навколо початку координат з кутовою швидкістю Ω ; у рівняннях про зміну кількості руху й моменту кількості руху, що записані у рухомій координатній системі, з'являються (у вигляді додаткових доданків) векторні добутки:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{K}}{dt} + \bar{\Omega} \times \bar{K} &= \bar{R}; \\ \frac{d\bar{L}}{dt} + \bar{\Omega} \times \bar{L} + \bar{\vartheta} \times \bar{K} &= \bar{M}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Два векторні рівняння (5.2) відповідають шести скалярним диференціальним рівнянням, записаним відносно проєкцій на зв'язані вісі. Згідно законів механіки, існує зв'язок між кінетичною енергією рушійного тіла W , проєкціями лінійних швидкостей $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$, кутових швидкостей $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ та векторів \bar{K} і \bar{M} :

$$\begin{cases} K_x = \frac{\partial W}{\partial \vartheta_x}; & K_y = \frac{\partial W}{\partial \vartheta_y}; & K_z = \frac{\partial W}{\partial \vartheta_z}; \\ L_x = \frac{\partial W}{\partial \omega_x}; & L_y = \frac{\partial W}{\partial \omega_y}; & L_z = \frac{\partial W}{\partial \omega_z}. \end{cases} \quad (5.3)$$

Автономні плавальні апарати відрізняються тим, що до процесу власного руху вони залучають прилеглі до них, суттєво змінювані, шари навколишнього середовища (рідини). Частки води, що знаходяться поблизу корпусу АПА, що

рухається, через в'язкість рідини починають переміщатися, придбаваючи певну кінетичну енергію за рахунок роботи електрорушії судна. Автономний плавальний апарат і середовище, що оточує його, утворюють взаємозв'язану цілісну у енергетичному відношенні систему. Тому для розрахунку параметрів руху АПА, як об'єкта керування, слід виходити з аналізу сумарної кінетичної енергії, що включає у себе, разом з енергією найтвердішого тіла, приєднану кінетичну енергію навколишнього середовища: $W = W_{\text{АПА}} + W_p$. При визначенні величини кінетичної енергії АПА $W_{\text{АПА}}$ вважають постійною його масу, форму корпусу й розподіл мас всередині корпусу.

За цих умов і наступних допущеннях, та якщо початок зв'язаної координатної системи поєднано з центром мас АПА ($x = y = z = 0$), а координатні вісі є головними центральними осями інерції $I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0$, то визначений запас кінетичної енергії АПА можна записати в матричній формі [196]:

$$W_{\text{АПА}} = 0,5 [\vartheta^T \Omega^T] D \begin{bmatrix} \vartheta \\ \Omega \end{bmatrix}, \quad (5.4)$$

де $\vartheta = [\vartheta_x \vartheta_y \vartheta_z]^T$; $\Omega = [\omega_x \omega_y \omega_z]^T$ – матриці лінійної та кутової швидкостей АПА, якщо ввести поняття матриці інерції твердого тіла

$$D = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz & -my \\ 0 & m & 0 & -mz & 0 & mx \\ 0 & 0 & m & my & -mx & 0 \\ 0 & -mz & my & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz & 0 & -mx & -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my & mx & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix},$$

де m – маса твердого тіла.

Кінетична енергія рідини може бути представлена у вигляді виразу [138]

$$W_p = 0,5 [\vartheta^T \Omega^T] \Lambda \begin{bmatrix} \vartheta \\ \Omega \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

де Λ – матриця приєднаних мас і моментів інерції АПА.

Таким чином, сумарна кінетична енергія АПА, що рухається в рідині, з урахуванням (5.4) і (5.5) визначається виразом

$$W = 0,5[\vartheta^T \Omega^T](D + \Lambda) \begin{bmatrix} \vartheta \\ \Omega \end{bmatrix}. \quad (5.6)$$

Для аналізу вільних переміщень АПА потрібна повна модель просторового руху твердого тіла, що знаходиться у рідкому середовищі. Спрощення допускаються тільки для окремих стаціонарних режимів, до яких відносяться рух і стабілізація апарата на заданій глибині, спливання й заглиблення по похилій траєкторії або вертикально.

При складанні рівнянь динаміки АПА враховано, що його форма не відповідає еліпсоїду обертання. Тому у матриці приєднаних мас і моментів інерції враховані позадіагональні елементи. При симетрії апарата відносно подовжньої вісі крім діагональних елементів ($\lambda_{11} \dots \lambda_{66}$ ($\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33}$ – приєднані маси; $\lambda_{44}, \lambda_{55}, \lambda_{66}$ – приєднані моменти інерції) значиму величину мають доданки $\lambda_{26} = \lambda_{62}$ і $\lambda_{35} = \lambda_{53}$ [110, 196]. Тому сумарна кінетична енергія АПА, що рухається у водному середовищі, згідно (5.6), дорівнює

$$W = \frac{1}{2} [\vartheta_x \vartheta_y \vartheta_z \omega_x \omega_y \omega_z] \begin{bmatrix} m + \lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m + \lambda_{22} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{26} \\ 0 & 0 & m + \lambda_{33} & 0 & \lambda_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} + \lambda_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{53} & 0 & I_{yy} + \lambda_{55} & 0 \\ 0 & \lambda_{62} & 0 & 0 & 0 & I_{zz} + \lambda_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vartheta_x \\ \vartheta_y \\ \vartheta_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}.$$

Після перемноження матриць отримаємо вираз

$$W = 0,5(m\vartheta_x^2 + m\vartheta_y^2 + m\vartheta_z^2 + I_{xx}\omega_x^2 + I_{yy}\omega_y^2 + I_{zz}\omega_z^2) + \lambda_{26}\vartheta_y\omega_z + \lambda_{35}\vartheta_z\omega_y. \quad (5.7)$$

За допомогою цього виразу (5.7) визначаємо проекції векторів і моментів кількості руху

$$\begin{cases} K_x = m_x \vartheta_x; & K_y = m_y \vartheta_y + \lambda_{26} \omega_z; & K_z = m_z \vartheta_z + \lambda_{35} \omega_y; \\ L_x = I_x \omega_x; & L_y = I_y \omega_y + \lambda_{35} \vartheta_z; & L_z = I_z \omega_z + \lambda_{26} \vartheta_y, \end{cases} \quad (5.8)$$

де $m_x = (1 + k_{11})m$; $m_y = m_z = (1 + k_{22})m$; $I_x = (1 + k_{44})I_{xx}$, $I_y = I_z = (1 + k_{66})I_{yy}$, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – моменти інерції відносно зв'язаних осей; k_{11}, k_{22}, k_{44} – безрозмірні коефіцієнти, які залежать від геометричних розмірів АПА та змінюються у діапазонах $k_{11} = 0,02 \dots 0,5$; $k_{44} = k_{66} = 0 \dots 1,0$.

Рівняння динаміки просторового руху АПА у загальному вигляді запишемо так:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_x \frac{d\vartheta_x}{dt} + m_z \omega_y \vartheta_z - m_y \omega_z \vartheta_y + \lambda_{35} \omega_y^2 - \lambda_{26} \omega_z^2 = R_x; \\ m_y \frac{d\vartheta_y}{dt} + \lambda_{26} \frac{d\omega_z}{dt} + m_x \omega_z \vartheta_x - m_z \omega_x \vartheta_z - \lambda_{35} \omega_x \omega_y = R_y; \\ m_z \frac{d\vartheta_z}{dt} + \lambda_{35} \frac{d\omega_y}{dt} + m_y \omega_x \vartheta_y - m_x \omega_y \vartheta_x + \lambda_{26} \omega_x \omega_z = R_z; \\ I_x \frac{d\omega_x}{dt} + (\lambda_{26} + \lambda_{35})(\omega_y \vartheta_y - \omega_z \vartheta_z) = M_x; \\ I_y \frac{d\omega_y}{dt} + \lambda_{35} \frac{d\vartheta_z}{dt} + \omega_x \omega_z (I_x - I_z) + \vartheta_x \vartheta_z (m_x - m_z) - \lambda_{26} \omega_x \vartheta_y - \lambda_{35} \omega_y \vartheta_x = M_y; \\ I_z \frac{d\omega_z}{dt} + \lambda_{26} \frac{d\vartheta_y}{dt} + \omega_x \omega_y (I_y - I_x) + \vartheta_x \vartheta_y (m_y - m_x) + \lambda_{35} \omega_x \vartheta_z + \lambda_{26} \omega_z \vartheta_x = M_z. \end{array} \right. \quad (5.9)$$

Праві частини системи рівнянь (5.9) утворюються гідродинамічними силами та моментами, силами ваги G , водотоннажності A та упору гвинта F_{Γ} електрорушії.

Специфічні особливості форми АПА відображаються у залежності гідродинамічних характеристик (функцій кінематичних параметрів руху). Багато апаратів мають розрізні горизонтальні стерна (елерони). При різному повороті лівої і правої лопатей на кути $\delta_{\text{л}}$ і $\delta_{\text{п}}$ диферентуючий момент керування визначається їх середнім значенням $\delta_{\Gamma} = 0,5(\delta_{\text{л}} + \delta_{\text{п}})$, а кренуючий момент – різницею $\Delta\delta_{\Gamma} = \delta_{\text{л}} - \delta_{\text{п}}$. Інша конструктивна особливість АПА полягає у тому, що при одновальній електрорушійній установці вісь вала рушії поєднується із подовжньою віссю апарата, а сам рушій утворюється двома гвинтами з протилежним обертанням (за допомогою проміжних механічних диференціалів, редукторів тощо). Завдяки цьому сила тяги орієнтується за Ox і виключаються супутні диферентуючі та кренуючі моменти, які могли б грати роль додаткових збурень.

З урахуванням наведених припущень, представимо зовнішні сили та моменти рівнянь (5.9) у такому вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_x = F_{\Gamma} - qv^{2/3}c_x(\alpha, \beta, \delta_{\Gamma}, \delta_B) + (A - G)\sin\psi; \\ R_y = qv^{2/3}c_y(\alpha, \omega_z, \delta_{\Gamma}) + (A - G)\cos\psi\cos\theta; \\ R_z = qv^{2/3}c_z(\beta, \omega_y, \delta_B) - (A - G)\cos\psi\sin\theta; \\ M_x = qv\xi_x(\beta, \omega_x, \Delta\delta_{\Gamma}) - Az_A\cos\psi\cos\theta - Ay_A\cos\psi\sin\theta; \\ M_y = qv\xi_y(\beta, \omega_x, \delta_B) - Ax_A\cos\psi\sin\theta - Az_A\cos\psi\cos\theta; \\ M_z = qv\xi_z(\alpha, \omega_z, \delta_{\Gamma}) - Ay_A\sin\psi - Ax_A\cos\psi\cos\theta, \end{array} \right. \quad (5.10)$$

де v – об'ємна водотоннажність АПА; c_x, c_y, c_z – безрозмірні характеристики або коефіцієнти подовжньої, нормальної і поперечної гідродинамічних сил; ξ_x, ξ_y, ξ_z – безрозмірні характеристики гідродинамічних моментів крену, рискання та диференту відповідно; α – кут атаки; β – кут дрейфу; ψ – кут диференту; θ – кут крену; $q = \frac{\rho v_B^2}{2}$ – швидкісний натиск; ρ – густина рідини; δ_{Γ} і δ_B – кути поворотів горизонтального та вертикального електрорушіїв відповідно.

У об'єктах морської підводної робототехніки використовують баророзвантажені електродвигуни (БЕД) різного типу, у яких внутрішній простір заповнений рідким діелектриком, у якому обертається ротор. Для створення узагальненої математичної моделі електрушійного пристрою АПА із БЕД різного роду струму необхідно використовувати систему [166].

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{дин}_{x,y,z}} = M_{\text{ед}} - Q_g - Q_{\Gamma_{x,y,z}}; \\ Q_g = K_q(\tau, D)\omega_{\text{ед}_{x,y,z}}; \\ Q_{\Gamma_{x,y,z}} = \begin{cases} \frac{k_Q \rho D_{\Gamma}^5}{4\pi^2} \left(\frac{\omega_{\text{ед}_{x,y,z}}}{i} \right)^2 & \text{при } J_{x,y,z} \in [-1; 1]; \\ k_q \rho D_{\Gamma}^3 \vartheta_{x,y,z}^2 & \text{при } J_{x,y,z}^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \\ F_{\Gamma_{x,y,z}} = \begin{cases} \frac{k_F \rho D_{\Gamma}^4}{4\pi^2} \left(\frac{\omega_{\text{ед}_{x,y,z}}}{i} \right)^2 & \text{при } J_{x,y,z} \in [-1; 1]; \\ k_f \rho D_{\Gamma}^2 \vartheta_{x,y,z}^2 & \text{при } J_{x,y,z}^{-1} \in (-1; 1); \end{cases} \\ J_{x,y,z} = \frac{2\pi\vartheta_{x,y,z}}{\omega_{\text{ед}_{x,y,z}} D_{\Gamma}}. \end{array} \right. \quad (5.11)$$

де $\vartheta_{x,y,z}$ – проєкції вектора швидкості переміщення АПА відносно води на відповідні осі прямого ходу АПА; D_{Γ} – діаметр гребного гвинта (лаговий, вертикальний і ходовий гвинти однакові); $Q_{\Gamma x,y,z}$ – проєкції гальмівного моменту гребного гвинта (ГГ) на відповідні вісі; $k_Q = f(J_{x,y,z})$ і $k_q = f(J_{x,y,z}^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують момент гребного гвинта; ρ – питома щільність води; $F_{\Gamma x,y,z}$ – проєкції рушійної сили (упору) гвинта на відповідні вісі; $k_F = f(J_{x,y,z})$ і $k_f = f(J_{x,y,z}^{-1})$ – безрозмірні коефіцієнти, що характеризують упор ГГ; $J_{x,y,z}$ – відносний крок лагового, вертикального і ходового ГГ; $J_{x,y,z}^{-1}$ – крок лагового, вертикального і ходового гребних гвинтів при реверсі [189].

Система рівнянь (5.11) представляють собою узагальнену математичну модель електрорушійного пристрою автономного плавального апарата [24].

Коефіцієнти k_Q, k_q, k_F, k_f нелінійні, визначаються з графічних залежностей, наведених в [166]. Оскільки коефіцієнти k_Q, k_q, k_F, k_f нелінійні, їх лінеаризацію проводиться за допомогою кусково-лінійної апроксимації характеристик дії ГГ. Сукупність графіків $k_Q = f(J), k_q = f(J^{-1}), k_F = f(J), k_f = f(J^{-1})$ [189] дозволяє моделювати упор і момент ГГ в усіх режимах роботи АПА.

Коефіцієнт гідродинамічних втрат K_q також є нелінійним. Його лінеаризацію виконано за допомогою апроксимації методом найменших квадратів експериментальних характеристик втрат гальмівного гідродинамічного моменту БЕД, отриманих для різних наповнюючих його діелектриків [166].

Вхідні впливи змінюються в діапазонах:

- температура робочої рідини (діелектрика) БЕД: до + 70 °С;
- вид робочої рідини (діелектрика) БЕД: етанол, гас, мастило Т750, мастило І12А;

– момент опору зовнішнього середовища $M_H = Q_{ГГ_{зв}} \dots Q_{ГГ_{пр}}$, де $Q_{ГГ_{зв}}$ – максимальний гальмівний момент ГГ при зворотному обертанні; $Q_{ГГ_{пр}}$ – максимальний гальмівний момент ГГ при прямому обертанні.

Вихідними даними удосконаленої математичної моделі (5.11) є $\omega_{ед,x,y,z}$ – кутова швидкість лагового, вертикального і ходового ГГ; $F_{ГГ_{x,y,z}}$ – упор лагового, вертикального і ходового ГГ; $\vartheta_{x,y,z}$ – проекції швидкості переміщення АПА при його просторовому русі.

Отже, удосконалена математична модель електрорушійного пристрою з БЕД при просторовому русі АПА (5.11) є лінеаризованою, може використовуватися для досліджень роботи складних морських рухомих об'єктів, у тому числі багатоцільових АПА, з урахуванням суттєвих нелінійних параметрів руху і складових елементів, збурень.

5.2 Визначення вимог щодо АСК курсом, необхідних для забезпечення реалізації можливостей підвищення точності і стабілізації багатоцільового АП на курсі

Підвищення безпеки мореплавства і експлуатаційних характеристик морських і річкових суден є важливими задачами сучасного судноплавства. Рішення таких задач вимагає безперервного удосконалення суднових навігаційних систем і автоматизованих систем керування рухом судна. Однією з ключових серед цих систем є система керування курсом судна (автокермо чи автостерно).

Система керування курсом сучасного морського судна повинна відповідати міжнародним вимогам (див. п. 1.3). Відповідно до вимог, основними задачами автостерна є: автоматичне утримання судна на заданому курсі, перехід судна з курсу на курс із заданою кутовою швидкістю або із заданим радіусом, керування рухом судна по траєкторії спільно з електронно-картографічною навігаційно-інформаційною системою (ЕКНІС).

Крім того, автостерна повинні мати можливість підлаштовуватися до зміни динамічних характеристик судна при різній погоді, до ступеня завантаження судна. Автостерно повинно автоматично утримувати судно на заданому курсі з точністю, при якій середнє значення курсу може відрізнитися від заданого на певний кут, при швидкості ходу, що забезпечує нормальну керованість судна. Максимальна амплітуда рискання не повинна перевищувати допустиму при ручному керуванні. Автостерно повинно забезпечувати автоматичне утримання судна на заданому курсі з мінімальним навантаженням на стернову машину за величиною і кількістю перекладань стерна. І це лише небагато функції автостерна сучасного морського судна [77, 224, 228].

Ефективна робота автостерна призводить до зменшення нищпорення судна і, як наслідок, зниження пропульсивних втрат і витрат енергії. Таким чином, удосконалення АСК рухом судна, з метою підвищення точності керування курсом при його зміні й стабілізації у різних погодних умовах і завантаженні судна є важливою задачею. Для багатоцільових АПА ця задача є дуже важливою, оскільки за її допомогою здійснюються спеціальні завдання.

Структура сучасних автостернових (*NAVPILOT xxx Series* фірми «*Furuno*», *AP3xxx* компанії «*Navis Engineering OY*», *PT500D* компанії «*Yokogawa*», *NautoPilot 5000* і *NP2025PLUS* компанії «*Raytheon*», *PilotStar D*, *Saura SA-10*, *Navitron* та ін.) дозволяє гнучко перебудовувати режими їх роботи, враховувати різні чинники і зовнішні впливи, використовуючи різноманітні датчики. Наприклад, як представлена на рис. 5.1 структурна схема автостерна типу «*NAVPILOT 4000*».

Безумовно, розробка сучасних АСК, що забезпечують рух судна по заданій траєкторії, утримання на заданому курсі в умовах змін погоди і інших факторів, обмеженості маневру та інтенсивності руху, автоматичну корекцію обраного шляху і швидкості руху – актуальні задачі. Значний внесок у розробку методів автоматизованого керування морськими судами внесли

Yorger D. R., Egeland O., Strand J. P., Nguyen T. D., Nomoto K., Armada M. A., G. van Leeuwen, Bech M., Åström K. J., Norrbin N. H., Balchen J. G., Fossen T. I., Balchen J. G., Nielsen U. D., Sorensen A. J., Healey L., J. van Amerongen, Lewandowski E. M., Källström C. G., Басін А. М., Тетюєв Б. А., Першиц Р. Я., Юдін Ю. І., Скороходов Д. А. та інші.

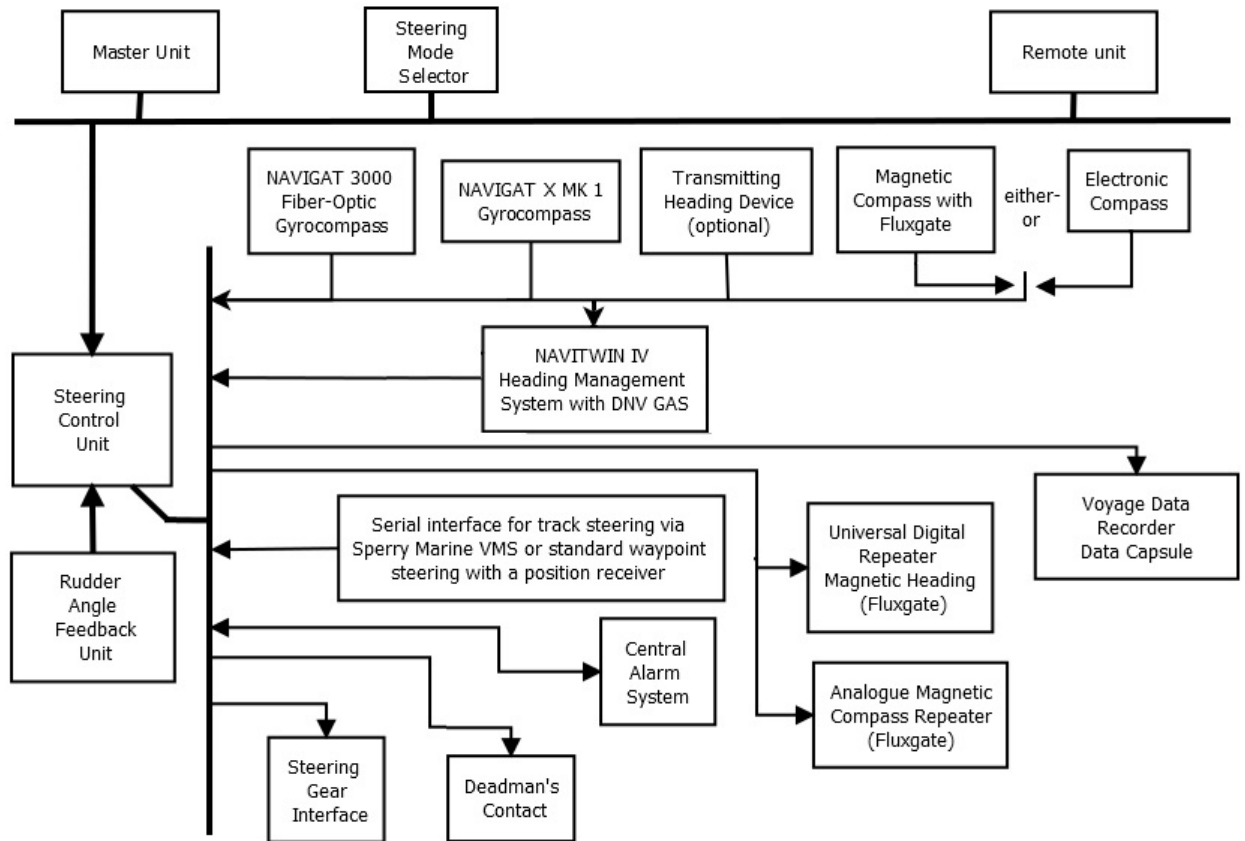


Рисунок 5.1 – Структурна схема автостерна «NAVIPLOT 4000»

Функціонування будь-якої АСК курсом ґрунтується на використанні математичної моделі динаміки стернового керування судном [161, 212, 233]. Природно, чим точніше математична модель (ММ) динаміки керування судном буде описувати фізичні властивості судна і умови його руху, тим більше ефективніше можна синтезувати АСК курсом, тим менше будуть підсумкові втрати енергії, знизяться динамічні навантаження на механізми судна, шуми і вібрації.

У даний час теорія керування судном досить добре розвинена і дозволяє будувати адекватні фізичним процесам руху судна математичні моделі [143, 234]. Математична модель судна зазвичай ґрунтується на шести ступенях

свободи руху твердого тіла в просторі [225, 235]. Однак система керування (керуючі контролери), що синтезована на основі такої моделі, виходить громіздкою, дорогою і у багато в чому – надлишковою та невиправдано гостро реагує на швидкоплинні зовнішні впливи.

Компромiс, між складністю математичної моделі системи стабілізації курсу і адекватністю цієї моделі реальним фізичним процесам, привів до розвитку суттєво спрощених математичних описів руху судна.

Міжнародна морська організація розробила і прийняла резолюцію А.751 (18), що регламентує необхідність використання ММ динаміки судна при вирішенні практичних задач, що лежать в області безпеки судноводіння [234]. Морськими класифікаційними органами рекомендовані для практичного використання в автостернових спрощені ММ судна – моделі Номото першого і другого порядку [28, 50, 161, 212].

Математична модель Номото першого порядку суттєво спрощена і часто застосовується для повірочних (оціночних, попередніх) розрахунків. Модель Номото другого порядку більш адекватна реальним фізичним процесам та описується диференціальним рівнянням:

$$T_1 \cdot T_2 (d^2 \omega / dt^2) + (T_1 + T_2) (d \omega / dt) + \omega + H(\omega) = K \alpha_r + K T_3 (d \alpha_r / dt), \quad (5.12)$$

де ω – кутова частота (швидкість розвороту) судна; $H(\omega) = v_1 |\omega| + v_2 \omega^3$ – нелінійна функція кутової частоти; $T_1, T_2, T_3, K, v_1, v_2$ – стали часу і основні параметри математичної моделі; α_r – кут перекладки стерна.

Практичне використання такої моделі (5.12) і синтез керуючих контролерів для системи стабілізації курсу [224, 254] ускладнені у зв'язку з необхідністю визначення для конкретного судна сталих часу і основних параметрів моделі (5.12): $T_1, T_2, T_3, K, v_1, v_2$. Одне з простих рішень задачі ідентифікації параметрів рівняння (5.12) представлено у [28], де враховується, що $d\psi(t)/dt = K_1 \omega(t)$. У цій формулі позначено: $\psi(t)$ – курсовий кут; K_1 – емпіричний конструктивний коефіцієнт судна.

Більшість відомих автоматизованих ССК [143, 157, 232] використовують у своєму складі класичні ПД-регулятори і засновані на

принципі стабілізації «за відхиленням». Відомо, що існує клас систем керування, заснований на принципах двоканального (інваріантного, комбінованого) керування. Проте цей принцип майже не застосовується у АСК курсом у зв'язку зі складністю вимірювання зовнішніх збурень, діючих на корпус судна та відхиляючих його від заданого курсу.

5.3 Розробка методу ідентифікації параметрів моделі багатоцільового АПА, що входить до складу системи стабілізації курсу

Ідентифікації параметрів різних математичних моделей судна, у тому числі – нелінійної моделі (5.12) Номото, присвячена дуже велика кількість публікацій, наприклад, [59, 97, 119]. Це підтверджує важливість і актуальність досліджень, пов'язаних з ідентифікацією параметрів моделей Номото. Аналіз зазначених [59, 97, 119] та інших [139, 213] публікацій показує, що автори досліджень використовують найрізноманітніші експериментальні дані і різноманітний математичний апарат ідентифікації. Це статистичний аналіз, нейро-нечіткі ідентифікація і моделювання, розкладання у періодичні функції, апроксимація різного виду і багато інших методів.

У Резолюціях ІМО А.160 (ES.IV), А.209 (VII), А.609 (15) говориться про необхідність забезпечення кожного з суден об'єктивними даними про його маневрені характеристики. Резолюція ІМО А.751 (18) вже конкретно рекомендує використовувати для забезпечення безпечного мореплавання і побудови систем керування такі параметри маневрених якостей, як поворотність, ризкання, стійкість на курсі, гальмівні характеристики [124]. Маневрені якості визначаються для кожного судна окремо, в основному, експериментальним шляхом, а всі основні результати випробувань знаходяться у виробника судна і у судновій документації.

Саме цей факт дозволяє використовувати наявні на кожному судні (або на судні подібного проекту) результати випробувань, таких як частота циркуляції, що встановилася і «зігзаг 10-10» або «зігзаг 20-20» [59, 97, 119, 139, 213].

5.3.1. Метод оцінки параметрів нелінійної моделі Номото другого порядку

Нехай є дві експериментальні характеристики судна:

а) статична залежність сталої кутової частоти циркуляції ω у функції кута перекладки стерна α_r (діаграма керованості, рис. 5.2);

б) результати маневреного випробування «зігзаг» (рис. 5.3). Відзначимо, що такі характеристики можуть бути одержані і у дослідному басейні – за допомогою зменшеної «подібної» копії судна, або – за допомогою повномасштабного, що враховує гідродинаміку судна, моделювання.

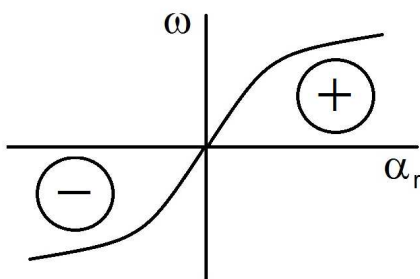


Рисунок 5.2 – Типова діаграма керованості судна

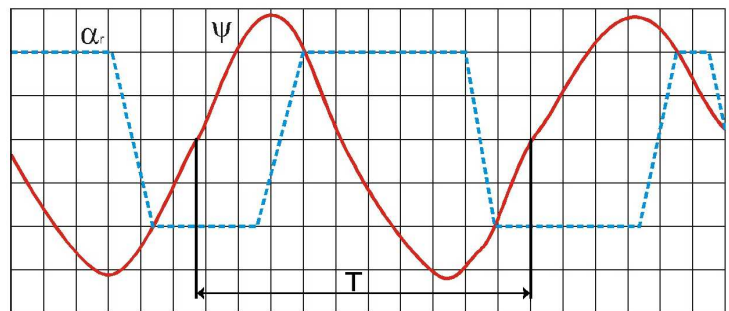


Рисунок 5.3 – Типова діаграма «зігзаг»

З аналізу рівняння (5.12) 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 (рис. 5.2) отримати вираз:

$$v_2\omega_i^3 + v_1\omega_i^2 + \omega = K\alpha_{ri}. \quad (5.13)$$

Розділивши вираз (5.13) на добуток $(\omega_i K)$, отримаємо:

$$v_2\omega_i^2 / K + v_1\omega_i / K + 1 / K = \alpha_{ri} / \omega_i. \quad (5.14)$$

Підставивши у (5.14) кілька різних значення частоти ω_i для відповідних кутів перекладки стерна, наприклад, 2, 4, 6, ..., 30 градусів, отримаємо систему із n -лінійних алгебраїчних рівнянь зі трьома невідомими v_2 / K , v_1 / K і $1 / K$, причому $n > 3$.

Це перевизначена, надлишкова, система (*RF – Redefined System* або *OS – Overdetermined System*) і вона не має точного класичного рішення. Відомі квазі-рішення перевизначених систем різного виду. Наприклад, одне з можливих рішень засноване на використанні методу найменших квадратів –

методу Лагранжа [117]. Результатом такого рішення може бути деякий апроксимуючий вираз. Графічне рішення являє собою криву, яка не проходить через експериментальні точки усталеної кутовий частоти циркуляцій ω у функції кута переключки стерна α_r . Потрібно підкреслити, що у той же час рішення на основі [117] повністю відображає експериментальну залежність, представлену на рис. 5.2, згладжуючи тим самим похибки (викиди, шуми) експерименту.

Таким чином знаходимо три невідомих параметра рівняння (5.13) – K, v_1, v_2 . Необхідно знайти ще три сталих часу T_1, T_2 і T_3 . Проведемо оцінку шуканих сталих часу у такий спосіб.

Аналізуємо вид експериментальної залежності «зігзаг» (рис. 5.3) – залежність курсового куту ψ у функції куту переключки стерна α_r . Можна помітити, що для сталого режиму (виключаючи перші коливання) 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. Для цього призначимо головний період $T = 1/\omega_1$, виходячи з графіка, наведеного на рис. 5.3. Обмежимося трьома першими непарними гармоніками розкладання: першою (основною), третьою і п'ятою.

У результаті розкладання у ряди отримаємо для вхідного сигналу три гармоніки. Кожна з гармонік буде характеризуватися амплітудою $A_{1r}(\omega_1)$, $A_{3r}(\omega_3)$ і $A_{5r}(\omega_5)$, а також фазою $\phi_{1r}(\omega_1)$, $\phi_{3r}(\omega_3)$, і $\phi_{5r}(\omega_5)$ для відповідних частот ω_1 , $\omega_3 = 3\omega_1$ і $\omega_5 = 5\omega_1$. За аналогією, у результаті розкладання, отримуємо для вихідного сигналу значення амплітуди $B_{1\psi}(\omega_1)$, $B_{3\psi}(\omega_3)$ і $B_{5\psi}(\omega_5)$, фази – $\phi_{1\psi}(\omega_1)$, $\phi_{3\psi}(\omega_3)$ і $\phi_{5\psi}(\omega_5)$.

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

$$\begin{aligned}
 K_1 \cdot e^{j\alpha_1} &= \frac{B_{1\Psi}}{A_{1r}} \cdot e^{j(\varphi_{1\Psi} - \varphi_{1r})}, \\
 K_3 \cdot e^{j\alpha_3} &= \frac{B_{3\Psi}}{A_{3r}} \cdot e^{j(\varphi_{3\Psi} - \varphi_{3r})}, \\
 K_5 \cdot e^{j\alpha_5} &= \frac{B_{5\Psi}}{A_{5r}} \cdot e^{j(\varphi_{5\Psi} - \varphi_{5r})}.
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

Для режиму малих відхилень можна знехтувати у (5.12) нелінійним членом $H(\omega)$. Тоді отримаємо:

$$T_1 \cdot T_2 (d^2\omega / d\omega^2) + (T_1 + T_2)(d\omega / dt) + \omega = K\alpha_r + KT_3(d\alpha_r / dt). \tag{5.16}$$

Передавальна функція, що відповідає виразу (5.16), буде мати вигляд:

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{\alpha_r(s)} = \frac{(T_3s + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}. \tag{5.17}$$

Очевидно, що після переходу у частотну область (провівши формальну заміну $s = j\omega$), нескладно записати із (5.15) і (5.17) систему із трьох рівнянь із трьома невідомими T_1, T_2 і T_3 :

$$\left. \begin{aligned}
 W_1(j\omega) &= \frac{(T_3j\omega_1 + 1)}{(T_1j\omega_1 + 1)(T_2j\omega_1 + 1)} = K_1 \cdot e^{j\alpha_1}; \\
 W_3(j\omega) &= \frac{(T_3j3\omega_1 + 1)}{(T_1j3\omega_1 + 1)(T_2j3\omega_1 + 1)} = K_3 \cdot e^{j\alpha_3}; \\
 W_5(j\omega) &= \frac{(T_3j5\omega_1 + 1)}{(T_1j5\omega_1 + 1)(T_2j5\omega_1 + 1)} = K_5 \cdot e^{j\alpha_5}.
 \end{aligned} \right\} \tag{5.18}$$

Система (5.18) легко вирішується сучасними обчислювальними засобами. Наприклад, у середовищі *Matlab* рішення системи рівнянь (5.18) здійснюється командою $[T_1, T_2, T_3] = solve(...)$ і у результаті знаходяться шукані значення T_1, T_2 і T_3 .

5.3.2. Побудова розрахункової математичної моделі для верифікації результатів ідентифікації параметрів багатоцільового АПА у системі стабілізації курсу

Для побудови математичної моделі, що дозволяє провести верифікацію результатів ідентифікації параметрів виразу (5.12) скористаємося засобами

Matlab/Simulink – графічним середовищем імітаційного моделювання. Це середовище дозволяє за допомогою блок-діаграм у вигляді направлених графів, будувати математичні моделі динамічних систем, включаючи дискретні, безперервні, гібридні, нелінійні і розривні системи, проводити Фур'є-аналіз та інші математичні обчислення і дії.

Верифікацію результатів ідентифікації параметрів (5.12) здійснимо за допомогою зіставлення результатів. Верифікацію проводимо на основі порівняння результатів комп'ютерного експерименту «зігзаг 10-10» (отриманих на повномасштабній *DMI*-моделі судна) і відповідних результатів математичного моделювання у середовищі *Matlab/Simulink*. Результати комп'ютерного експерименту «зігзаг 10-10» представимо у вигляді таблиць даних у функції часу, з апроксимацією проміжних значень (рис. 5.4).

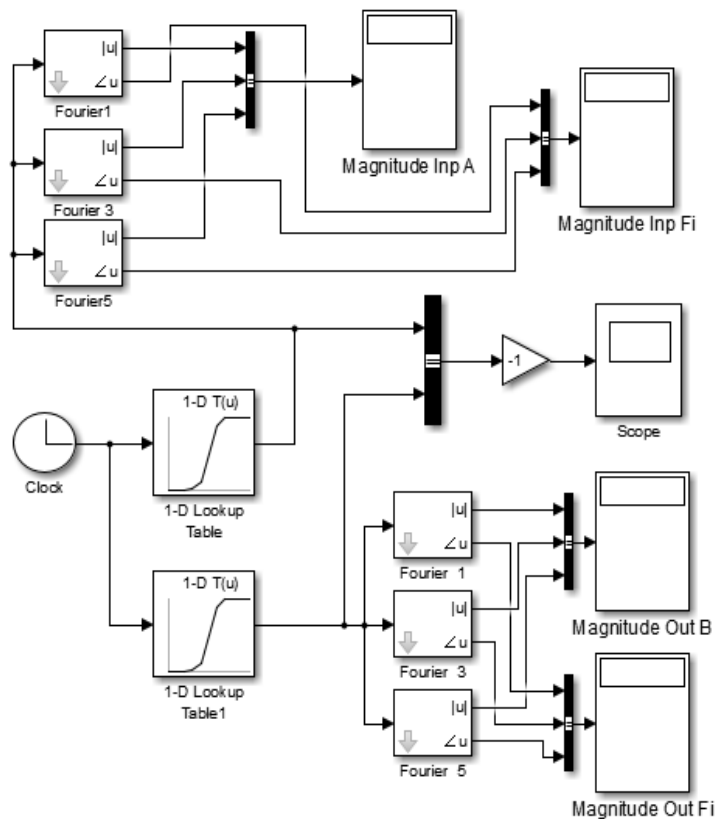


Рисунок 5.4 – Структурна схема моделі для Фур'є-аналізу результатів експерименту «зігзаг»

Далі представимо (5.17) у вигляді:

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{\alpha_r(s)} = \frac{(T_3s + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} = \frac{(T_3s + 1)}{(T_1 \cdot T_2s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)}. \quad (5.19)$$

Теорія автоматичного керування і регулювання, наприклад, [193, 226], дозволяє уявити вирази, подібні (5.19), у вигляді блок-діаграми (структурної схеми). Причому структурна схема у формі Коші містить тільки блоки інтегрування, алгебраїчного підсумовування і пропорційного посилення.

Очевидно, що при такому поданні нескладно врахувати відкинуту раніше у (5.17) нелінійність $H(\omega)$. Крім того, у математичній моделі врахуємо, що:

- а) курсової кут визначається інтегруванням кутової частоти ω ;
- б) перекладки керма α_r у потрібний момент часу, згідно з алгоритмом керування «зігзаг», моделюються елементом «петля гістерезису» – «*Relay block*»;

в) динаміку стернової машини, що обмежує швидкість повороту стерна, представимо у вигляді підсистеми *Subsystem*.

З урахуванням сказаного вище, структурна схема математичної моделі, яка описує експеримент «зігзаг» в середовищі *Matlab/Simulink*, наведена на рис. 5.5. У схемі враховано перехід «рад/с – градуси».

На рис. 5.6 приведена структурна схема блоку *Subsystem*, що імітує динаміку стернової машини судна.

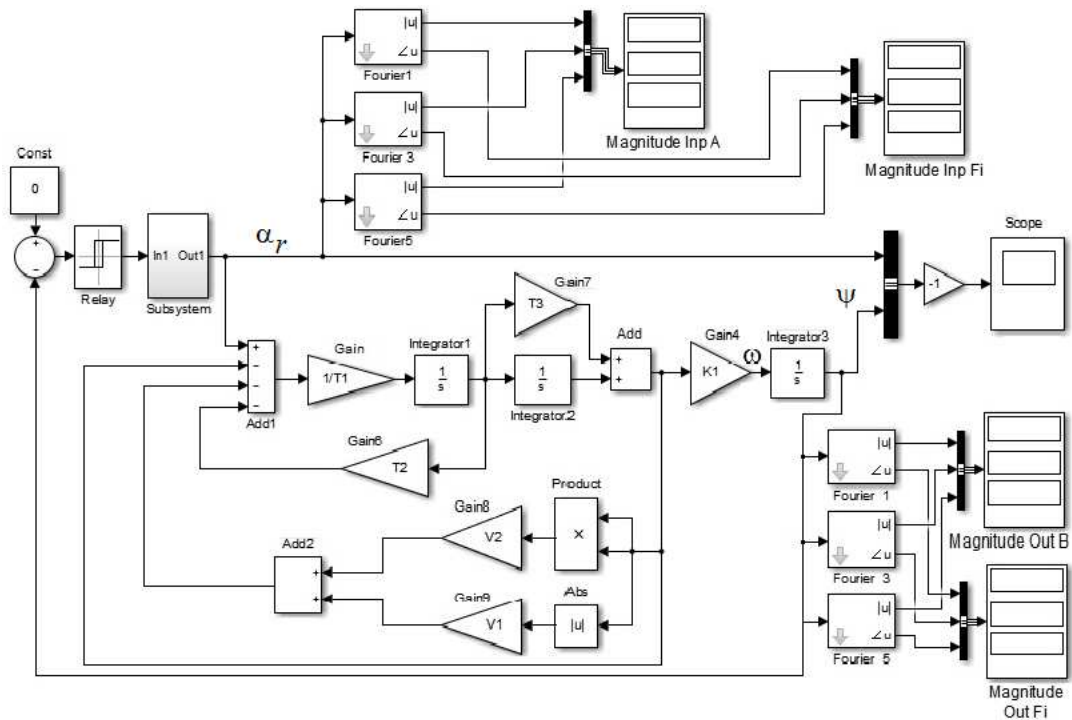


Рисунок 5.5 – Структурна схема, що описує експеримент «зігзаг» і Фур'є-аналіз

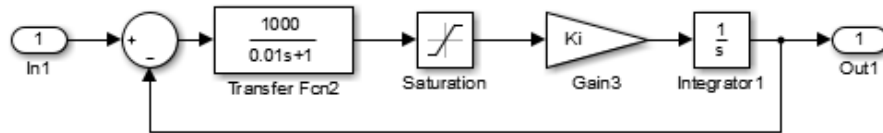


Рисунок 5.6 – Підсистема: структурна схема кермової машини

5.3.3. Результати моделювання

З метою пояснення пропонованої процедури моделювання, у якості вихідних даних взяті наступні наявні параметри багатоцільового судна криголамного типу.

1. Довжина судна по конструктивній ватерлінії, $L_{\text{КВЛ}} = 70,5$ м.
2. Осадка судна на міделі, $d_M = 3,5$ м.
3. Коефіцієнт загальної повноти, $\delta = 0,664$.
4. Коефіцієнт повноти мідель-шпангоуту, $\beta = 0,903$.
5. Коефіцієнт повноти конструктивної ватерлінії, $\alpha = 0,858$.
6. Площа змоченої поверхні судна, $S = 1240$ м².
7. Площа виступаючих частин, $F_B = 5$ м².
8. Інтервал швидкості судна, $V \in 2 \dots 20$ вузлів.
9. Об'ємна водотоннажність, $W = 2864$ м³.
10. Сумарна потужність енергетичної установки, $N = 4600$ кВт.

За допомогою повномасштабного тренажера динаміки судна Національного університету «Одеська морська академія», для *DMI*-моделі багатоцільового судна криголамного типу (Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова) проведені комп'ютерні експерименти і побудовані:

а) статична залежність сталої кутової частоти циркуляцій ω в 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*, що входять до складу середовища моделювання *Matlab/Simulink*. Входом таблиць є

таймер модельного часу *Clock*, виходами – кут перекладки стерна і курсовий кут (рис. 5.4).

Обробка результатів, відповідно до виразу (5.14), 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. 5.4) з обробкою результатів за допомогою Фур'є-аналізу за (5.18) та подальшого рішення цієї системи, дозволили знайти члени рівняння (5.12) T_1, T_2 і T_3 , що залишилися. На цій основі побудована модель, наведена на рис. 5.5. Параметри цієї математичної моделі наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Ідентифіковані параметри моделі (5.12)

K	v_1	v_2	T_1	T_2	T_3
0,031	$-1,7 \cdot 10^{-3}$	$-6,1 \cdot 10^{-4}$	31	15	5

Швидкість наростання зміни повороту стернової машини 3 град/с. На рис. 5.7 наведено порівняння результатів експерименту та отриманих за допомогою ідентифікованої моделі випробувань «зігзаг 10-10».

На рис. 5.7 пунктирною лінією (індекс 1) показані дані експерименту, неперервною лінією (індекс 2) – дані моделювання.

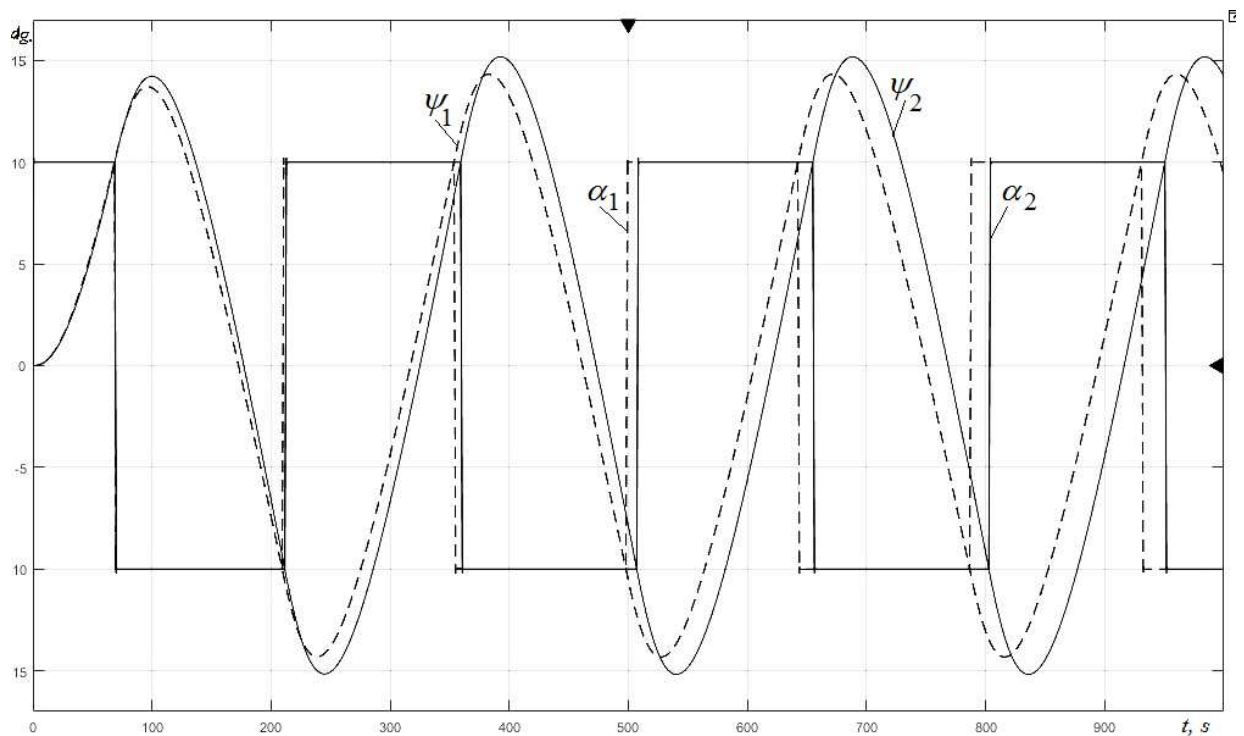


Рисунок 5.7 – Верифікація результатів моделювання маневреного випробування «зігзаг 10-10»: 1 – експеримент, 2 – моделювання

5.4 Розробка методу введення у АСК курсом багатоцільового АПА властивостей часткової інваріантності до вітро-хвильових збурень

Головне зовнішнє навантаження (вітрове, хвильове), що діє на судно, має складний характер і створює головний збурюючий вплив на роботу системи стабілізації курсу (ССК). Попередньо, у найбільш загальному вигляді, розглянемо особливості функціонування такої системи стабілізації, що заснована на застосуванні принципу двоканального керування.

Нехай для будь-якого моменту часу відомо значення головного збурення $I(s)$ і точка його дотику до системи стабілізації вихідної координати $Y(s)$. За допомогою введення у систему стабілізації властивостей інваріантності до збурень, можна суттєво поліпшити статичні і динамічні властивості всієї системи без втрати її стійкості (Г. В. Щипанов, Б. Н. Петров). Однією з вимог теорії інваріантності є наявність двох каналів передачі збурень. Тобто головною задачею є вимір збурення, його математична обробка і уведення другим каналом до системи стабілізації що видно з аналізу роботи динамічної системи, показаної на рис. 5.8. Відзначимо, що реальні двоканальні системи зазвичай забезпечують часткову компенсацію тільки одного, головного, обраного збурення. Ця компенсація досягається за рахунок зміни структури системи керування – структурної компенсації головного збурення. Але при практичній реалізації двоканальних систем керування домогтися абсолютної інваріантності до збурень неможливо. Нехай деяке збурення $F(s)$ діє на об'єкт керування $W_o(s)$ у замкненій системі (див. рис. 5.8).

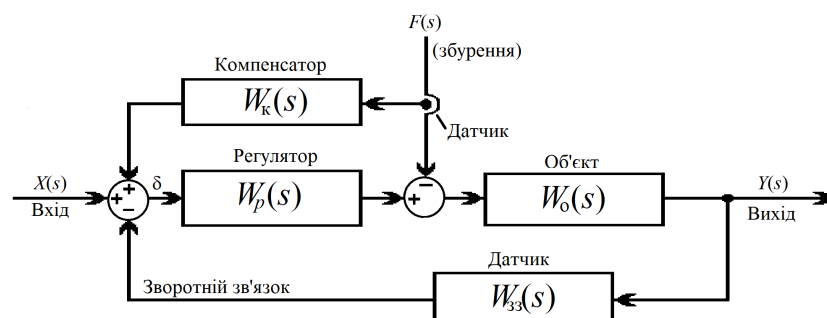


Рисунок 5.8 – Структурна схема двоканальної динамічної системи стабілізації

Якби вдалося фізично створити додатковий канал, проходячи через який збурення «+ $F(s)$ » перетворювалося у «- $F(s)$ », то дія збурення на об'єкт повністю усунеться, що витікає з виразу, отриманому із рис. 5.8:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{X(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s) - F(s) \cdot W_o(s) + F(s) \cdot W_k(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{33}(s)}$$

Якщо поставити вимогу $F(s) \cdot W_o(s) + F(s) \cdot W_k(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s)$, то формальною умовою повної інваріантності до $F(s)$ буде виконання співвідношення $W_k(s) = 1/W_p(s)$.

Саме це і є одним з головних достоїнств будь-яких інваріантних систем керування, оскільки на збурюючий вплив, зазвичай, не накладаються обмеження, за винятком максимального значення його величини.

Проте, для ССК судна практично реалізувати введення сигналу, що компенсує вітро-хвильові збурення які відхиляють судно від заданого курсу, досить складно, оскільки безпосереднє вимірювання збурення майже не можливо і пов'язано з технічними труднощами, які принципово складно вирішити. Слід зазначити, що реалізація у СКК спостерігачів різного типу (наприклад, Люенбергера повного порядку), використання еталонних (явних, неявних) моделей, сигнального і/або параметричного самонастроювання, адаптивних, нечітких та інших сучасних систем керування також дуже непрості задачі [125, 156, 232], яка вимагає додаткових досліджень при суттєвих капітальних і часових затратах.

Пропонується досить простий метод уведення у систему стабілізації властивостей часткової інваріантності до вітро-хвильового навантаження, заснований на непрямому визначенні основного збурення $I_c(s)$, відхиляючого судно від заданого курсу.

Як зазначено вище, для реалізації будь-якої інваріантної до збурень системи керування, необхідно знати точку прикладання збурення, не фізичну точку, а умовну – у структуру моделі. Вважаємо, що основне збурення $I_c(s)$ приведено до куту повороту стерна судна, що цілком допустимо з позицій

застосування загальної теорії автоматичного керування у даній постановці задачі.

Нехай збурення $I(s)$ діє на об'єкт керування $W_o(s)$ у замкнутій системі $X(s)$ – задає сигнал системи, $Y(s)$ – вихідна координата. Система містить елементи, що описані ПФ: $W_p(s)$ – ПД-регулятор, $W_o(s)$ – судно, як об'єкт керування (модель Номото), $W_{зз}(s)$ – датчик зворотного зв'язку. Необхідно створити додатковий інформаційний канал, проходячи через який вітровохвильове збурення « $+I(s)$ » перетвориться у « $-I(s)$ » і дія на об'єкт цього збурення усунеться:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{X(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s) - I(s) \cdot W_o(s) + I(s) \cdot W_k(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{зз}(s)}. \quad (5.20)$$

Для (5.20) поставимо умову $I(s) \cdot W_o(s) = I(s) \cdot W_k(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s)$ і умовою інваріантності до $I(s) \in W_k(s) = 1/W_p(s)$. Для функціонування такого додаткового каналу необхідно мати датчик збурення $I(s)$ і фізично (програмно, апаратно) реалізувати ПФ компенсатора $W_k(s)$, яка є зворотною ПФ ПД-регулятора $W_k(s) = 1/W_p(s)$, що дозволить отримати значення збурення $I(s)$ зі знаком «мінус». Якщо коефіцієнти передачі вузла вимірювання $I(s)$ і компенсації $W_k(s)$ залишаються незмінними у широкому діапазоні амплітуд і частот, то властивість інваріантності системи керування буде існувати практично для всіх амплітуд і частот збурення $I(s)$.

Непрямий вимір головного збурення заснований на принципі «диференціальної виделки» (рис. 5.9) – шукане збурення I_c визначиться на основі вимірювання сигналів X_1 і Y_1 , тобто $I_c = X_1 W_1(s) - Y_1 / W_2(s)$.

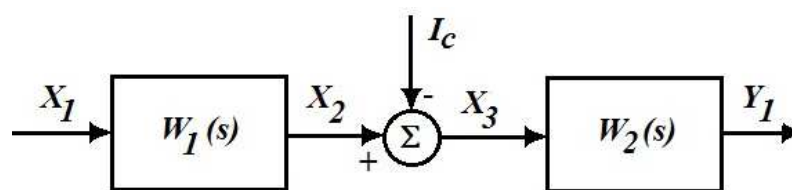


Рисунок 5.9 – Принцип «диференціальної виделки»

На рис. 5.10 представлена функціональна схема двоканальної автоматизованої ССК судна, що забезпечує, за рахунок використання додаткового компенсаційної зв'язку, досягнення часткової інваріантності до головного збурення. На рис. 5.10 позначено: РК – регулятор курсового куту ψ судна; КМ – замкнутий контур керування стерновою машиною судна; МС – ПФ моделі судна, яка заснована на рівнянні (5.12) 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 в ССК.

Оцінку головного вітро-хвильового збурення проведемо за виразом, що впливає з структурної схеми, зображеної на рис. 5.9:

$$I_c(s) = I(s) - \psi(s) / W_c(s), \quad (5.21)$$

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 .

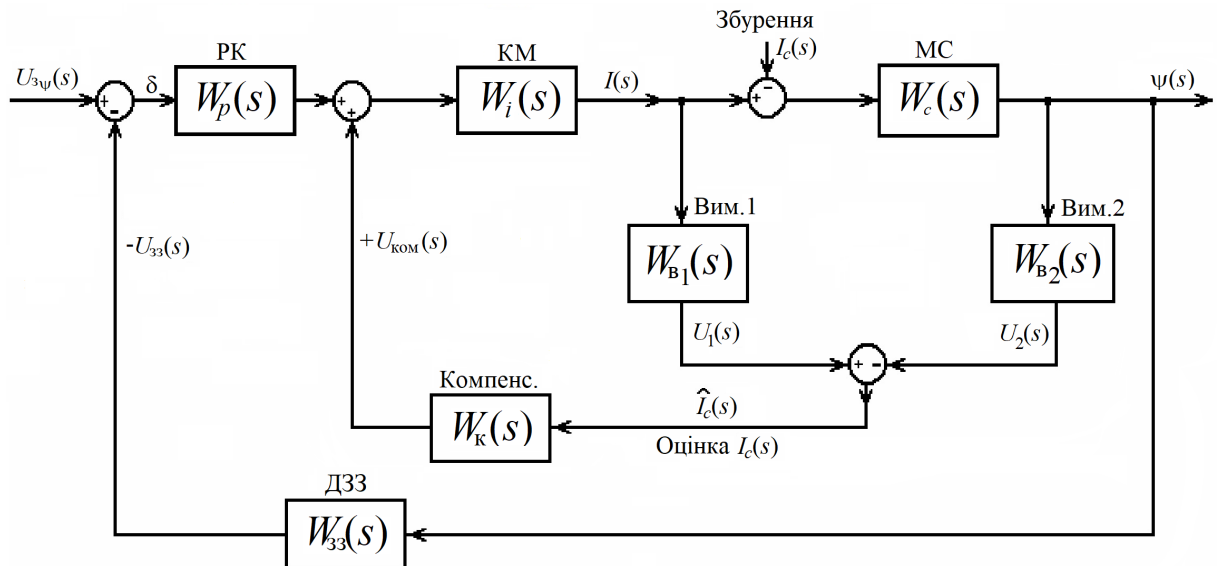


Рисунок 5.10 – Функціональна схема двоканальної ССК, що забезпечує часткову інваріантність до вітро-хвильового збурення $I_c(s)$

Очевидно, що цифрова чи аналогова реалізація вираження (5.21) вимагає обчислення похідних з усіма наслідками, що впливають, відомими, технічними проблемами і обмеженнями. Врахуємо, що реальні пристрої вимірювання куту повороту стерна і курсового куту ψ мають властивості

фільтрування і часто описуються аперіодичними ланками зі сталими часу T_c і T_T , відповідно.

Встановимо на виході датчика куту повороту стерна фільтр (аперіодичну ланку) зі коефіцієнтом передачі і сталою часу, точно такими, як і у датчика курсового куту, а на виході датчика курсового куту – фільтр (аперіодичну ланку) із коефіцієнтом передачі і сталою часу, такими, як у датчика куту повороту стерна. Це суттєво спрощує технічну реалізацію двоканальної системи – за рахунок отримання спільного знаменника у передаточних функцій. З урахуванням викладеного прийому отримання спільного знаменника, ділянку структурної схеми, що дозволяє оцінити головне збурення $I_c(s)$, наведено на рис. 5.11.

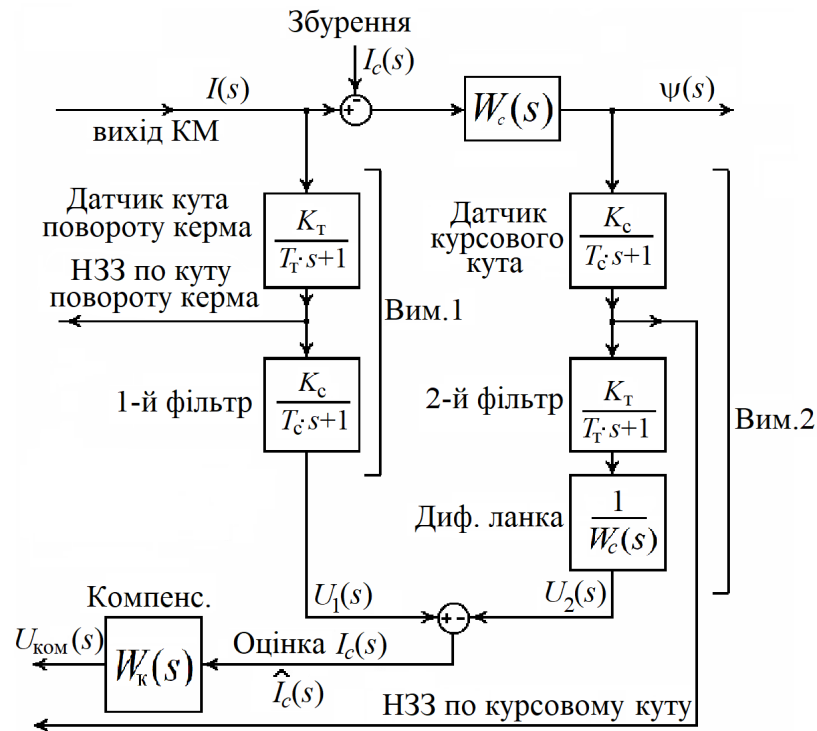


Рисунок 5.11 – Частина структурної схеми (рис. 5.8), що реалізує оцінку головного збурення

Слід зазначити, що оцінене значення головного збурення буде завжди мати динамічну похибку, яка у найкращому випадку визначається інерційністю аперіодичної ланки другого порядку $1/((T_c T_T)s^2 + (T_c + T_T)s + 1)$.

Збурення, оцінене за допомогою наведеної на рис. 5.11 структурної схеми, визначається виразом:

$$\hat{I}_c(s) = I_c(s) \cdot \frac{K_T}{(T_T \cdot s + 1)} \cdot \frac{K_c}{(T_c \cdot s + 1)}. \quad (5.22)$$

У вираз (5.22) входить складова $1/W_c(s)$, згідно (5.21).

Очевидно, що:

– результуюча точність оцінки $\hat{I}_c(s)$ залежить від точності технічної реалізації виразу $1/W_c(s)$;

– у системі з датчиком курсового куту і обсервації оцінка буде грубішою, оскільки інерційність такого вимірювального каналу досить висока і її можна порівняти з інерційністю стернової машини;

– передаточна функція ланки компенсуючого зв'язку $W_k(s) = W_i^{-1}(s)$ не може бути точно реалізована, оскільки зворотна

$$W_i(s) \approx \frac{1/k_T}{2 \cdot T_{\mu 1}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu 1} \cdot s + 1} \text{ передаточна функція: } W_c = 1/W_i(s).$$

Тому приймаємо

$$W_c(s) = \frac{2 \cdot T_{\mu 1} \cdot s + 1}{0,05 \cdot T_{\mu 1} \cdot s + 1} \cdot k_T, \quad (5.23)$$

що, є свою чергу, також є помітним спрощенням, заснованим, також на наближеній математичній моделі стернової машини судна.

Математичну модель судна, засновану на виразі (5.12) можна представити у середовищі *Matlab/Simulink* так, як наведено на рис. 5.12. У цій моделі враховані нелінійні елементи у вигляді блоків *Product*, *Gain 2*, *Gain 5*, *Gain 6*, *Add* і *Abs*.

Моделювання системи (див. рис. 5.10), з урахуванням дії каналу компенсації головного збурення, проведено за допомогою схеми, створеної у *Matlab/Simulink*, що наведена на рис. 5.13, з використанням методології, викладеної у [14, 109, 135]. Головне збурення моделювалося як періодична сума двох гармонійних впливів (*SineWave*) різної амплітуди і частоти і фазового зсуву. У якості вихідних даних для моделювання прийняті параметри багатоцільового судна (див. п. 5.3.3). Параметри моделі (5.10) засновані на результатах ідентифікації [28, 106, 235] (див. табл. 5.1).

Динаміка роботи стернової машини описана ПФ аперіодичної ланки із сталою часу $T_i = 3,5\text{c}$.

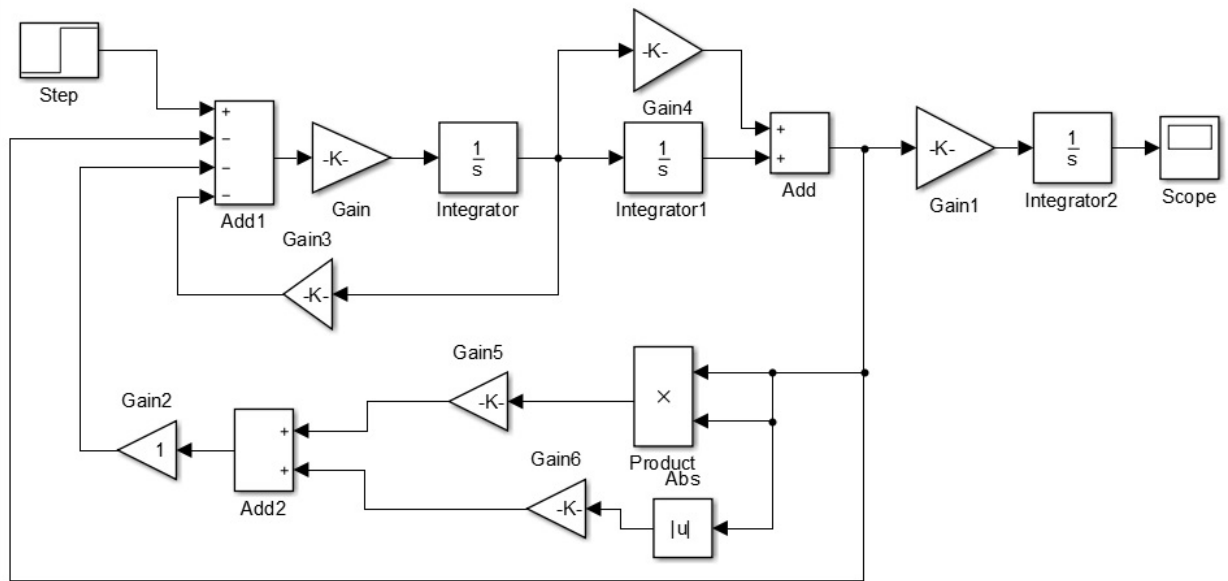


Рисунок 5.12 – Реалізація виразу (5.1) у *Matlab/Simulink*, як *Subsystem* і *Subsystem 4*, що наведені на рис. 5.13

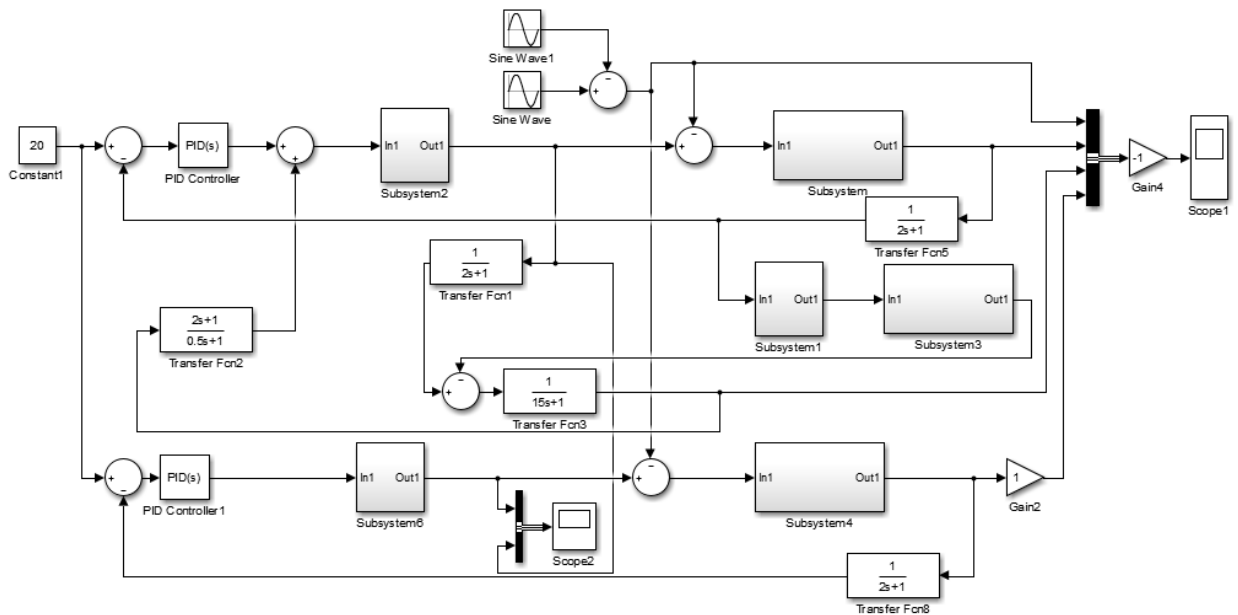


Рисунок 5.13 – Модель АСК курсом судна з реалізацією принципу двоканального керування на основі непрямого визначення головного збурення

На рис. 5.14 показані процеси зміни у часі результуючого збурення (крива 1).

Це дуже потужне збурення, яке викликає суттєву зміну курсу судна. Автостерно намагається відпрацювати це збурення з допомогою ПІД-регулятора курсу. Параметри ПІД-регулятора обрані за допомогою синтезу

замкнутої ССК так, щоб результуючі процеси зміни курсового куту ψ відповідали налаштуванню системи на технічний оптимум (за завданням).

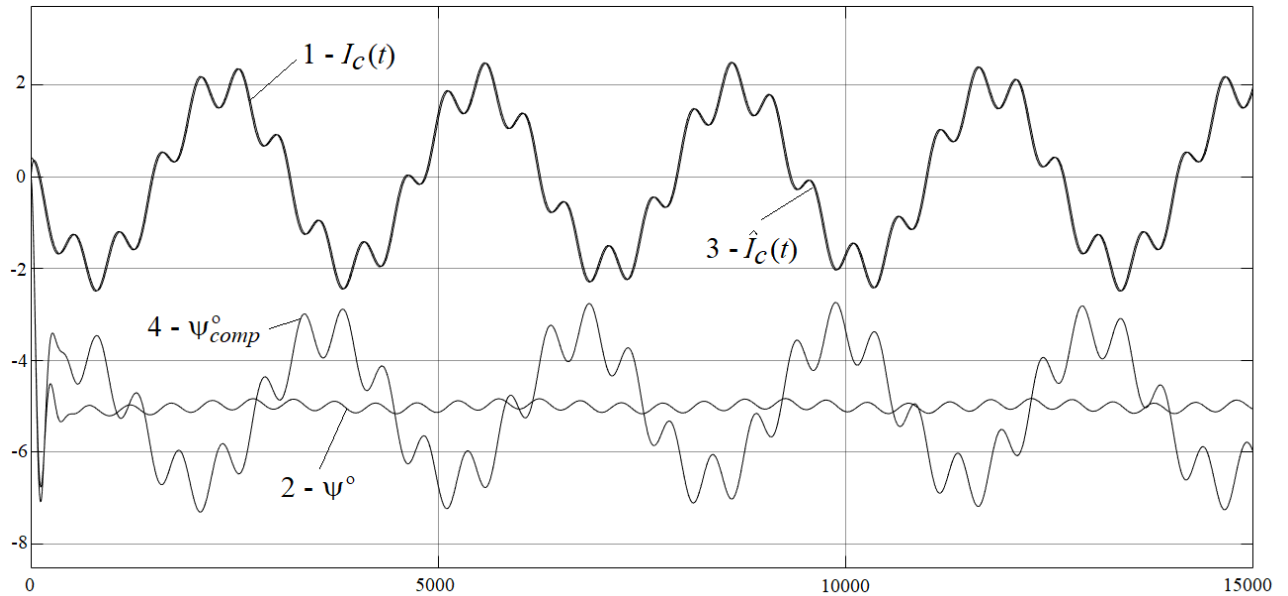


Рисунок 5.14 – Результати моделювання системи (рис. 5.10 і 5.11) з урахуванням дії головного збурення та його компенсації

Аналізуючи результат моделювання, можна зробити висновок, що стабілізація курсового куту ψ на заданому ССК рівні у -5° з відхиленням у $\pm 2^\circ$ (крива 2) класичною системою з ПД-регулятором майже не здійснюється.

При використанні запропонованої оцінки $I_c(t)$ і за допомогою установки додаткового каналу компенсації результуючого збурення (див. рис. 5.10 і рис. 5.11), динаміка ССК, навіть без зміни налаштування ПД-регулятора автостерна, суттєво поліпшується. Це ілюструється графіком 3, наведеним на рис. 5.14, який показує оцінені значення $I_c(t)$ (що практично збігається з кривою 1). Крива 4 показує зміну курсового куту у запропонованій частково-інваріантній до збурень системі стабілізації курсу.

На рис. 5.15 показані процеси зміни результуючого збурення (крива 1) у моменти часу $t_1 = 2800$ с, $t_2 = 5800$ с, $t_3 = 8700$ с та $t_4 = 12000$ с і $t_4 = 12000$ с. Це збурення викликає зміну курсу судна, та за рівнем приведено до куту повороту стерна на 5° . Автостерно відпрацьовує збурення за

допомогою ПД-регулятора – стабілізує курсовий кут ψ на заданому ССК рівні у 15° . Параметри ПД-регулятора обрані за допомогою синтезу замкненої системи так, щоб результуючі процеси зміни курсового куту ψ відповідали настроюванню системи на технічний оптимум (за завданням).

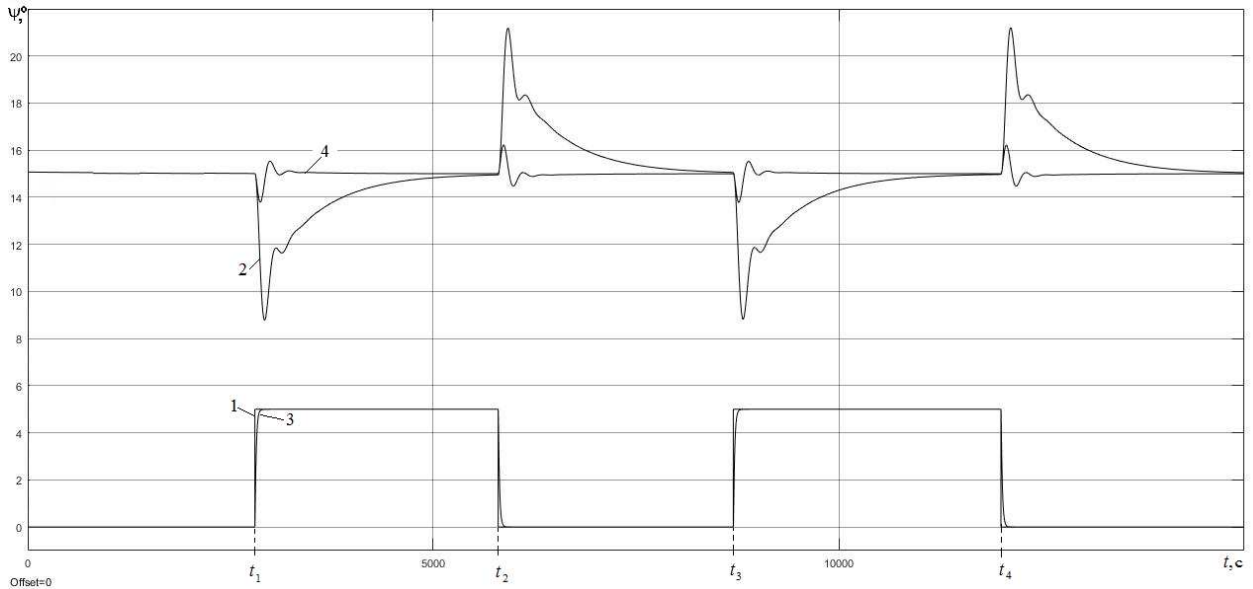


Рисунок 5.15 – Результати моделювання системи (див. рис. 5.10 і рис. 5.11) з урахуванням дії компенсуючого головного збурення

При використанні запропонованої оцінки $I_c(t)$ збурення (див. рис. 5.10 і рис. 5.11), динаміка ССК, навіть без зміни настроювання ПД-регулятора автостерна, суттєво покращується. Це ілюструється кривою 3, наведеною на рис. 5.15, яка показує $\hat{I}_c(t)$ – оцінене значення $I_c(t)$, і кривою 4 – змінюванням курсового куту у пропонованій частково-інваріантній до збурень системі.

Додатково проведено комп'ютерне моделювання та напівнатурні випробування системи стабілізації швидкості електрорушії, що функціонує у складі ССК АПА (параметри АПА наведені у розд. 2).

Цей етап дослідження проведено за допомогою авторського спеціалізованого моделюючого комплексу (СМК) [165] та синтезованої, на основі узагальненої функціональної схеми рушійного-стернового комплексу АПА (див. розд. 2), системи керування при горизонтальному прямолінійному русі АПА з ПД- і нечітким регулятором (рис. 5.16), з елементами позитивного зворотного зв'язку, що уведений у склад ССК.

На рис. 5.16 представлені графіки функціонування АСК РСК із БАД при горизонтальному прямолінійному русі АПА з різними типами регуляторів.

Графіки отримані за допомогою комп'ютерного моделювання та при експериментальних дослідженнях із використанням СМК. Аналізу піддавалася робота АСК електрорушієм із БАД при стабілізації швидкості переміщення АПА при горизонтальному русі.

На рис. 5.16, *а* позначено: крива 1 – результати комп'ютерного моделювання роботи АСК РСК при стабілізації швидкості переміщення при горизонтальному русі АПА; крива 2 – експериментальні результати, отримані за допомогою СМК, при таких же умовах, як і при моделюванні.

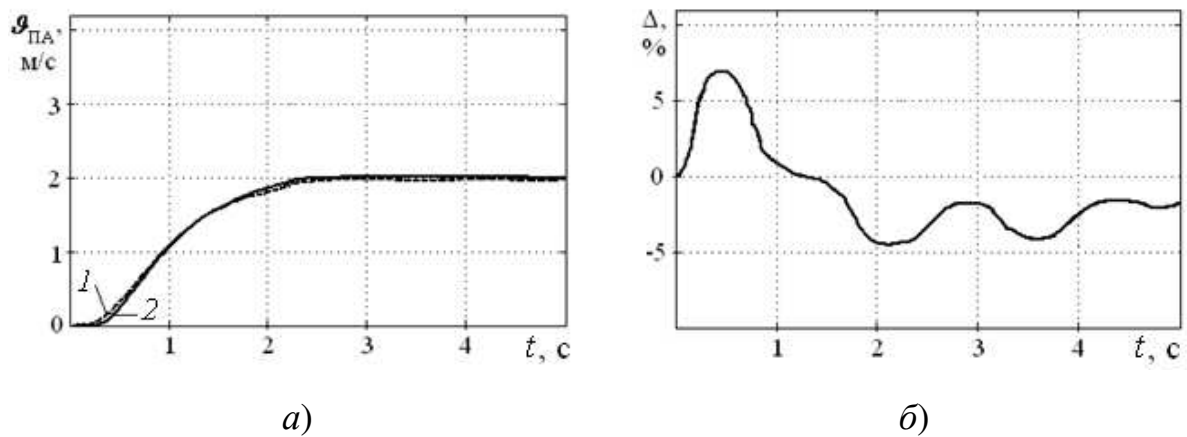


Рисунок 5.16 – Графіки роботи АСК РСК при горизонтальному прямолінійному русі АПА: *а*) – результати порівняння експериментальних досліджень; *б*) – розбіжність результатів комп'ютерного моделювання та результатів експериментальних досліджень

Слід відзначити, що система стабілізації швидкості є стійкою, перерегулювання відсутнє, а час перехідного процесу складає близько 2,2 с. Тобто малий АПА, приблизно за 2,5 с досягає швидкості руху у 2 м/с і стабільно її підтримував. Саме це дозволяє стверджувати про вірність теоретичних викладень, що забезпечують ефективність функціонування електрорушіїв у системах стабілізації швидкості і високих можливостях використання цих систем у режимах стабілізації курсового куту.

Висновки до розділу 5

1. Наведено метод синтезу математичних моделей системи електроруху багатоцільового АПА і її маршового баророзвантаженого електродвигуна, як об'єктів керування. Ці математичні моделі дозволили визначити вимоги щодо АСК курсом морського судна, що необхідно для реалізації процесів підвищення точності і стабілізації багатоцільового АПА на курсі.

2. Уперше запропоновано метод ідентифікації параметрів математичної моделі морського судна, що функціонує у режимі стабілізації курсового куту. Проведена верифікація отриманих результатів ідентифікації за допомогою експериментальних даних підтвердила достовірність методу.

3. Розроблено метод введення у АСК курсом багатоцільового АПА властивостей часткової інваріантності до вітро-хвильових збурень. Із аналізу результатів математичного моделювання цієї уперше запропонованої системи стабілізації курсового куту морського судна, визначено, що пропонована система є ефективною, дозволяє суттєво підвищити якість керування курсом судна і має можливості спрощеної технічної реалізації. Аналіз результатів роботи запропонованої АСК судна показав, що більш ефективна стабілізація курсового куту обумовлена підвищенням швидкодії автостерна – за рахунок запобіжного впливу на стерно судна, сформованого каналом позитивного зворотного зв'язку за збуренням. Саме цей ефект визначає зменшення витрат енергії і забезпечує збільшення дальності автономної дії суден.

4. Згідно отриманих результатів моделювання ССК за умови компенсації результуючого збурення на судно, з використанням класичної системи стабілізації «за відхиленням» і ППД «технічно оптимального» регулятора автостерна, максимальне динамічне відхилення становить $\pm 2^\circ$. За аналогічних умов навантажень, але з роботою запропонованої частково-інваріантної до збурень ССК, максимальне динамічне відхилення, близьке до $0,35^\circ$. При інших умовах навантажень, отримуємо максимальне динамічне відхилення, близько до $1,3^\circ$ при часі регулювання (входження у 5 % зону) до 200 с.

5. Проведені експериментальні дослідження роботи синтезованої системи рушійно-стернового комплексу при горизонтальному прямолінійному русі АПА. Розбіжність результатів комп'ютерного моделювання та результатів експериментальних досліджень незначна і складає 5...8 %.

Основні наукові результати розділу опубліковано в [14, 24, 28, 40].

РОЗДІЛ 6

ПІДТРИМКА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ТЕХНІЧНОМУ ОБСЛУГОВУВАННІ І РЕМОНТІ БАГАТОЦІЛЬОВОГО АПА, ПРИ СИНТЕЗІ КОНСТРУКЦІЙ ЙОГО ЕЛЕКТРОРУШІВ

6.1 Розробка методу відбору організацій для технічного обслуговування і ремонту багатоцільового АПА

6.1.1. Забезпечення багатоцільового АПА технічним обслуговуванням і ремонтom

На основному етапі життєвого циклу [145, 171] будь-якої складної технічної системи (СТС) [145, 219], а саме – на етапі її експлуатації [163, 167, 193], завжди виникає проблема забезпечення цієї системи кваліфікованим і якісним технічним обслуговуванням і ремонтом (ТОіР) [58, 100, 101]. Ця проблема суттєво ускладнюється для особливих СТС, наприклад, для систем, обладнання та устаткування спеціального призначення, якими є досліджувані АПА.

Існує великий клас устаткування і СТС [8, 168], які повинні обслуговуватися і ремонтуватися з дотриманням особливих вимог не тільки до технічної складової забезпечення ТО і Р, а і до особового складу ремонтно-обслуговуючого персоналу (кваліфікація, допуск до державної таємниці тощо), до підприємства, яке забезпечує ТО і Р (до спроможності підприємства виконати спеціальні вимоги до сертифікації, використання документації ДСК, до розташування, виконання особливих методів ТО і Р тощо).

На прикладі необхідності забезпечення якісним ТО і Р багатоцільового АПА типу «ріка-море» [167] розглянемо проблемні особливості аргументованого обрання такого підприємства, яке задовольнить ряду основних та спеціальних вимог до проведення ТО і Р.

Складність обрання такого підприємства полягає, у першу чергу у тому, що АПА і багатоцільові судна найчастіше не можуть обслуговуватися на

цивільних судноремонтних заводах і верфях (через необхідність забезпечення особливих допусків, ліцензій і сертифікатів, наявності та можливості необхідного доступу до інформації, наявності спеціального обладнання, кваліфікованих кадрів вузького фаху, спеціалізованих запчастин, вимірювальних інструментів, матеріалів, тощо). Але у зв'язку із:

а) швидкими змінами зовнішньополітичної ситуації для України;

б) появою і розвитком ринкових пропозицій з ТО і Р, у тому числі й закордонних судноремонтних заводів, які мають необхідні технології і гарантії;

в) зростаючою кількістю вітчизняних приватних і державних організацій і підприємств, готових проводити ТО і Р на особливих умовах, у тому числі – тендерних, постає неоднозначна проблема «найкращого» вибору такої обслуговуючої організації, яка б задовольняла низці умов.

Саме аргументований вибір найкращої за багатьма критеріями такої обслуговуючої організації і є важливою, актуальною науково-практичною задачею, вирішення якої забезпечує, у кінцевому підсумку, найкращу якість проведення ТО і Р. Саме це означає і найвищу (у даному контексті – найкращу), з можливих варіантів, ефективність використання фінансових і інших ресурсів, усуває корупційні ризики [8, 209] і суб'єктивний розподіл ресурсів, забезпечуючи гарантовану надійність функціонування і виконання технологічних функцій та спеціальних завдань СТС – багатоцільових АПА [168].

Під час аргументованого прийняття рішення (з низки можливих варіантів), виникають додаткові складнощі у зв'язку із тим, що судноремонтні організації і підприємства характеризуються різномірними, інколи – суперечливими, властивостями та параметрами [58, 100, 101, 198, 208]. Часто, за низкою параметрів і характеристик, одна з передбачуваних організацій забезпечення ТО і Р, може суттєво відрізнятись у найкращий бік, а за іншими параметрами – бути найгіршою. Але при цьому коректно обґрунтувати і аргументувати зіставлення різномірних параметрів і характеристик не завжди вдається. Саме

тому завдання відбору «оптимального» постачальника послуг ТО і Р повинне вирішуватися на основі одночасного, аргументованого і зіставленого обліку усіх обраних для аналізу параметрів і характеристик, і є до цього часу є невирішеним.

Зрозуміло, що під час відбору «оптимальної» організації виникають труднощі порівняння обраних параметрів і характеристик, що пов'язано з несумісністю значень окремих параметрів і характеристик, вимірюваних різнотипними шкалами, лінгвістичними оцінками, якісними й кількісними характеристиками. Але при формальному використанні методів кваліметрії [62, 203] часто виникають і логічні помилки. Наприклад, після бального ранжирування параметрів і характеристик СТС проводяться математичні операції з балами, так само, як і з числовими значеннями цих параметрів і характеристик. Зрозуміло, що некоректно використовувати математичні операції зі значенням параметра «Особливості оплати», вимірюваного лінгвістичними характеристиками {«Передоплата», «Кредит», «Оплата за результатом»}, у той час коли, наприклад, параметр «Ціна», вимірюється кількісно, дозволяє однозначне порівняння і допускає проведення математичних дій.

Таким чином, рішення проблеми «оптимального» відбору організації з проведення ТО і Р для багатоцільового АПА є актуальною науковою задачею, яка включає в себе також і перехід до єдиної шкали вимірювання з необхідністю збереження смислового навантаження аналізованих параметрів і характеристик.

Для оцінки та співставлення різних можливих технічних рішень існують різні методи, наприклад [192, 203, 208, 219]. Проте, для вирішення задачі обрання організації (наприклад – постачальника послуг, проектувальника, забезпечення ТО і Р, тощо) для оцінювання якості пропонованих пропозицій (наприклад – у тендерних процедурах [209]) можуть застосовуватися різні автоматизовані системи підтримки прийняття рішень (СППР).

6.1.2. Застосування методів теорії нечітких множин при обранні «найкращого» підприємства для забезпечення ТО і Р багатоцільового АПА

Припустимо, що для аналізу за попередніми критеріями, відібрані деякі організації (підприємства, судноверфі тощо) які пропонують послуги ТО і Р для багатоцільових АПА. Кожна організація, із розглянутої їх кінцевої кількості (n -організацій), характеризується низкою параметрів (m -параметрів, характеристик, можливостей), які представлені та описані у різних шкалах, термінах і розмірностях. Завдання полягає у тому, щоб відібрати з усіх аналізованих організацій найкращу, у деякому «інтегральному» оцінюючому сенсі.

Введемо наступні позначення. Нехай:

a) $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ – множина, що складається із переліку n -організацій, з яких потрібно відібрати одну з найкращими параметрами на основі інтегрованої оцінки спроможностей забезпечення організації ТО і Р багатоцільового АПА, як СТС;

б) $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – множина характерних m -параметрів, що описують характеристики й можливості здійснення виробничої діяльності (ТО і Р) n -організацій із множини O .

Таким чином, необхідно ранжирувати елементи універсальної множини O у порядку інтегральної переваги. Це ранжирування здійснюється шляхом порівняння значень множини P обраних для аналізу характерних параметрів. Зрозуміло, що параметри, характеристики та можливості всіх обраних організацій представлені у множині P і мають різні способи оцінки – як однозначні числові $ОД$, так і лінгвістичні нечіткі $НЧ$. Тому, з метою забезпечення можливості їх об'єктивного порівняння і зіставлення, необхідно здійснити перехід від різнотипних оцінок параметрів до параметрів, що вимірюються у одній шкалі розмірностей [162, 203, 208].

Шкалу розмірностей встановимо на інтервалі дійсних чисел від нуля до одиниці: $[0, 1]$. Для кожної організації постачальника послуг з ТО і Р

багатоцільового АПА вважаємо, що $o_i \in O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ (при $i = 1, n$), за значенням кожного параметра $p_j \in P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ (при $j = 1, m$), встановлює числову оцінку $\mu_i(o_i) \in [0, 1]$. Така оцінка визначає, наскільки організація зі множини O вище або нижче найкращої за j -м параметром на основі мінімаксного принципу порівняння. Врахуємо, що у фазі-логіці під нечіткою множиною A розуміється сукупність упорядкованих пар, складених з елементів x універсальної множини X і відповідних ступенів належності $\mu_A(x)$ [146, 221]. Отже, кожна з організацій o_i , з універсальної множини O , може бути описана не різнорідними значеннями характеристик і параметрів, а низкою відповідних ним числових оцінок $\{\mu_1(o_i), \mu_2(o_i), \dots, \mu_m(o_i)\}$, при цьому вимірюваних на одному загальному інтервалі $[0, 1]$, тобто у відповідних ступенях приналежності.

Зрозуміло, що у такій постановці легко, для будь-якого параметру $p_j \in P$, знайти характерне значення (наприклад, мінімальне або максимальне) усередині ступенів належності $\{\mu_1(o_i), \mu_2(o_i), \dots, \mu_m(o_i)\}$, що дозволяє об'єктивно порівнювати і оцінювати кожен з організацій за цим параметром.

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:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad (6.1)$$

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

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad (6.2)$$

Для використання зазначених властивостей нечітких множин у результуючих інтегральних оцінках, уявімо нечітку множину, що задана на універсальній множині організацій O :

$$\dot{p}_j = \left\{ \frac{\mu_j(o_1)}{o_1}, \frac{\mu_j(o_2)}{o_2}, \dots, \frac{\mu_j(o_n)}{o_n} \right\}, \quad (6.3)$$

де функція приналежності $\mu_j(o_i)$, характеризує i -організацію на універсальній множині $o \in O$.

Зрозуміло, що ранжирування повинно відбуватися з урахуванням вагових коефіцієнтів g_j , визначених експертами або за способом «найгіршого значення», який буде описаний далі. Тоді

$$\mu_{\dot{p}}(o_i) = \sum_{j=1}^m g_j \cdot \mu_j(o_i), \quad (6.4)$$

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

Вагові коефіцієнти g_1, g_2, \dots, g_m характеризують вагу, тобто, 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 $o_i \in O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$.

Запишемо:

а) транспоновану матрицю

$$G = [g_1, g_2, \dots, g_m]^T,$$

яка є матрицею вагових коефіцієнтів, що характеризують відносну значущість кожного з параметрів;

б) матрицю значень функції приналежності

$$M = \begin{bmatrix} \mu_1(o_1) & \dots & \mu_m(o_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ \mu_1(o_n) & \dots & \mu_m(o_n) \end{bmatrix}.$$

Тепер, використовуючи теорію матриць, можна записати добуток:

$$M_{\dot{p}} = M \cdot G, \quad (6.5)$$

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. Зрозуміло, що організацією з найвищим інтегральним показником буде та, у якій найбільше (максимальне) значення функції приналежності:

$$\mu_{\dot{p}}(o_{opt}) = \max_{o_i \in O} \mu_{\dot{p}}(o_i). \quad (6.6)$$

Щоб використовувати такий метод визначення найкращої (у інтегральному значенні) з усіх можливих організацій, які надають послуги ТО і Р для конкретного багатоцільового АПА, як СТС, необхідно встановити коефіцієнти важливості (вагові коефіцієнти) параметрів, характеристик і можливостей цих організацій [232].

Розглянемо експертний метод ідентифікації вагових коефіцієнтів g_i на основі методу «найгіршого значення», що використовує методологію системного аналізу СТС.

Визначаємо, що сума всіх вагових коефіцієнтів ($g_1 + g_2 + \dots + g_m = 1$) і коефіцієнти g_i будуть розподілятися між організаціями відповідно до встановлених для них рангів.

Позначимо ранг R_i , де $i=1, n$, як ранг організації з множини $o_i \in O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ відносно параметрів p_j з множини $p_j \in P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, при $j=1, m$. Зрозуміло, чим вище ваговий коефіцієнт організації, яка надає послуги ТО і Р для багатоцільового АПА тим вище її ранг. Така залежність може бути представлена у найпростішому випадку лінією регресії першого порядку. Припустимо, що:

$$g_1 \cdot R_1^{-1} = g_2 \cdot R_2^{-1} = g_3 \cdot R_3^{-1} = \dots = g_l \cdot R_l^{-1} = \dots = g_n \cdot R_n^{-1}, \quad (6.7)$$

де o_l – найгірша l -та організація з множини за O за деяким j -м параметром з множини P , з рангом R_l та ваговим коефіцієнтом g_l . Використав ранг виділеної найгіршої організації за параметром p_i та за допомогою (6.7), визначимо інші вагові коефіцієнти – через ранги організацій з множини $o_i \in O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$:

$$g_1 = R_l \cdot g_l \cdot R_l^{-1} = g_l; \quad g_2 = R_2 \cdot g_l \cdot R_l^{-1}; \quad \dots; \quad g_n = R_n \cdot g_l \cdot R_l^{-1}. \quad (6.8)$$

Таким чином, за допомогою отриманих виразів можна визначити вагові коефіцієнти всіх організацій, використовуючи їхню відносність до рангу найгіршої за даним параметром з конкуруючих організацій забезпечення ТО і Р (див. табл. 6.1, [198, 203, 209]).

Для ілюстрації можливостей методу, розглянемо найпростіший приклад. Нехай є шість конкуруючих організацій, що описані множиною $\{o_1, o_2, \dots, o_6\}$ і які пропонують послуги TO і P для багатоцільового АПА [168]. Встановимо дев'ять параметрів і характеристик, за якими проводиться оцінка реальних можливостей організацій: $\{p_1, p_2, \dots, p_9\}$. Фактичний опис параметрів представлений у табл. 6.2.

Таблиця 6.1 – Визначення рангу організації 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 6.2 – Визначені параметри оцінювання організацій забезпечення TO і P багатоцільового АПА

Параметр	Опис параметру, характеристики	Шкала, одиниця виміру
p_1	Якість дефектації багатоцільового АПА	{Дуже Низька; Низька; Середня; Висока; Дуже Висока}
p_2	Строки дефектації багатоцільового АПА	$\{0, \infty\}$, днів
p_3	Розрахункова вартість TO і P багатоцільового АПА	$\{0, \infty\}$, тис. грн.
p_4	Розрахункові строки TO і P багатоцільового АПА	$\{0, \infty\}$, днів
p_5	Імідж організації	{Дуже Низький; Низький; Середній; Високий; Дуже Високий}
p_6	Умови сплати за послуги дефектації, TO і P багатоцільового АПА	{Передоплата; Кредит; За фактом}

Продовження таблиці 6.2

p_7	Сервісне й гарантійне обслуговування багатоцільового АПА	{ 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 }

Слід ще раз підкреслити, що під час аналізу даних табл. 6.2 необхідно спільно обробляти дані кількісної шкали відносин (наприклад, «Строки» і «Вартість») і дані якісних шкал порядку (наприклад, «Якість», «Фінансовий стан», «Віддаленість» й ін.). Тобто, якщо для кількісної шкали допустимі логіко-арифметичні операції і порівняння, то для якісної шкали і шкали найменувань застосовувати арифметичні операції принципово неможливо. Наприклад, для параметрів, виражених у шкалі найменувань допустимо тільки порівняння («Так» чи «Ні»), а для якісної шкали – тільки експертні висловлювання термінами нечіткої логіки. Так, встановлені експертами значення параметрів (див. табл. 6.1 та табл. 6.2) для конкуруючих організацій наведені у табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Параметри оцінки організації щодо забезпечення ТО і Р

Параметр	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

У табл. 6.4, за кожним з оцінюваних параметрів, виділений найгірший параметр (НП) з множини P і встановлений відповідний ранг (табл. 6.1, [209]).

За допомогою виразів (6.4)–(6.8) можна визначити вагові коефіцієнти всіх організацій, використовуючи їхню відносність до рангу найгіршої, за даним параметром, з множин конкуруючих організацій забезпечення ТО і Р багатоцільового АПА.

Параметр p_1 . Найгірше його значення (4) у організації o_1 . Найгірший ваговий коефіцієнт за параметром p_1 організації o_1 :

$$g_1 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \right) = \left(\frac{4}{4 + 7 + 5 + 9 + 8 + 10} \right) = 0,093.$$

Таблиця 6.4 – 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 (6.8), вагові коефіцієнти інших організацій:

$$g_1 = R_1 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 4 \cdot 0,093 / 4 = 4 \cdot 0,0232 = 0,093;$$

$$g_2 = R_2 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 7 \cdot 0,0232 = 0,162; \quad g_3 = R_3 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 5 \cdot 0,0232 = 0,116;$$

$$g_4 = R_4 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 9 \cdot 0,0232 = 0,208; \quad g_5 = R_5 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 8 \cdot 0,0232 = 0,186;$$

$$g_6 = R_6 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 10 \cdot 0,0232 = 0,232.$$

Параметр p_2 . Найгірше його значення (5) у організації o_4 . Найгірший ваговий коефіцієнт за параметром p_2 організації o_4 :

$$g_4 = \left(\frac{R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \right) = \left(\frac{5}{7 + 7 + 8 + 5 + 6 + 7} \right) = 0,125.$$

Згідно (6.8), вагові коефіцієнти інших організацій:

$$g_1 = R_1 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 7 \cdot 0,125 / 5 = 7 \cdot 0,025 = 0,175;$$

$$g_2 = R_2 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 7 \cdot 0,025 = 0,175; \quad g_3 = R_3 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 8 \cdot 0,025 = 0,2;$$

$$g_4 = R_4 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 5 \cdot 0,025 = 0,125; \quad g_5 = R_5 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 6 \cdot 0,025 = 0,15;$$

$$g_6 = R_6 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 7 \cdot 0,025 = 0,175.$$

Параметр p_3 . Найгірше його значення (6) у організації o_6 . Найгірший ваговий коефіцієнт за параметром p_3 організації o_6 :

$$g_6 = \left(\frac{R_6}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \right) = \left(\frac{6}{9 + 8 + 8 + 7 + 7 + 6} \right) = 0,133.$$

Згідно (6.8), вагові коефіцієнти інших організацій:

$$g_1 = R_1 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 9 \cdot 0,133 / 6 = 9 \cdot 0,022 = 0,2;$$

$$g_2 = R_2 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 8 \cdot 0,022 = 0,177; \quad g_3 = R_3 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 8 \cdot 0,022 = 0,177;$$

$$g_4 = R_4 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 7 \cdot 0,022 = 0,155; \quad g_5 = R_5 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 7 \cdot 0,022 = 0,155;$$

$$g_6 = R_6 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 6 \cdot 0,022 = 0,133.$$

Параметр p_4 . Найгірше його значення (4) у організації o_6 . Найгірший ваговий коефіцієнт за параметром p_4 організації o_6 :

$$g_6 = \left(\frac{R_6}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \right) = \left(\frac{4}{9 + 9 + 8 + 5 + 7 + 4} \right) = 0,095.$$

Згідно (6.8), вагові коефіцієнти інших організацій:

$$g_1 = R_1 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 9 \cdot 0,095 / 4 = 9 \cdot 0,024 = 0,214;$$

$$g_2 = R_2 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 9 \cdot 0,024 = 0,214; \quad g_3 = R_3 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 8 \cdot 0,024 = 0,192;$$

$$g_4 = R_4 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 5 \cdot 0,024 = 0,12; \quad g_5 = R_5 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 7 \cdot 0,024 = 0,168;$$

$$g_6 = R_6 \cdot g_6 \cdot R_6^{-1} = 4 \cdot 0,024 = 0,095.$$

Параметр p_5 . Найгірше його значення (7) у організації o_2 . Найгірший ваговий коефіцієнт за параметром p_5 організації o_2 :

$$g_2 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \right) = \left(\frac{7}{8 + 7 + 9 + 10 + 10 + 8} \right) = 0,135.$$

Згідно (6.8), вагові коефіцієнти інших організацій:

$$g_1 = R_1 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 8 \cdot 0,135 / 7 = 8 \cdot 0,019 = 0,153;$$

$$g_2 = R_2 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 7 \cdot 0,019 = 0,135; \quad g_3 = R_3 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 9 \cdot 0,019 = 0,171;$$

$$g_4 = R_4 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 10 \cdot 0,019 = 0,19; \quad g_5 = R_5 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 10 \cdot 0,019 = 0,19;$$

$$g_6 = R_6 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 8 \cdot 0,019 = 0,153.$$

Параметр p_6 . Найгірше його значення (2) у організації o_4 . Найгірший ваговий коефіцієнт за параметром p_6 організації o_4 :

$$g_4 = \left(\frac{R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \right) = \left(\frac{2}{10 + 7 + 10 + 2 + 3 + 10} \right) = 0,048.$$

Згідно (6.8), вагові коефіцієнти інших організацій:

$$g_1 = R_1 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 10 \cdot 0,048 / 2 = 10 \cdot 0,024 = 0,24;$$

$$g_2 = R_2 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 7 \cdot 0,024 = 0,168; \quad g_3 = R_3 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 10 \cdot 0,024 = 0,24;$$

$$g_4 = R_4 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 2 \cdot 0,024 = 0,048; \quad g_5 = R_5 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 3 \cdot 0,024 = 0,072;$$

$$g_6 = R_6 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 10 \cdot 0,024 = 0,24.$$

Параметр p_7 . Найгірше його значення (2) у організації o_2 . Найгірший ваговий коефіцієнт за параметром p_7 організації o_2 :

$$g_2 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \right) = \left(\frac{7}{8 + 7 + 8 + 9 + 8 + 10} \right) = 0,140.$$

Згідно (6.8), вагові коефіцієнти інших організацій:

$$g_1 = R_1 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 8 \cdot 0,14 / 7 = 8 \cdot 0,02 = 0,16;$$

$$g_2 = R_2 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 7 \cdot 0,02 = 0,14; \quad g_3 = R_3 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 8 \cdot 0,02 = 0,16;$$

$$g_4 = R_4 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 9 \cdot 0,02 = 0,18; \quad g_5 = R_5 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 8 \cdot 0,02 = 0,16;$$

$$g_6 = R_6 \cdot g_2 \cdot R_2^{-1} = 10 \cdot 0,02 = 0,2.$$

Параметр p_8 . Найгірше його значення (2) у організації o_4 . Найгірший ваговий коефіцієнт за параметром p_8 організації o_4 :

$$g_4 = \left(\frac{R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \right) = \left(\frac{2}{10 + 9 + 9 + 2 + 9 + 4} \right) = 0,046.$$

Згідно (6.8), вагові коефіцієнти інших організацій:

$$g_1 = R_1 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 10 \cdot 0,046 / 2 = 10 \cdot 0,023 = 0,23;$$

$$g_2 = R_2 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 9 \cdot 0,023 = 0,207; \quad g_3 = R_3 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 9 \cdot 0,023 = 0,207;$$

$$g_4 = R_4 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 2 \cdot 0,023 = 0,046; \quad g_5 = R_5 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 9 \cdot 0,023 = 0,207;$$

$$g_6 = R_6 \cdot g_4 \cdot R_4^{-1} = 4 \cdot 0,023 = 0,092.$$

Параметр p_9 . Найгірше його значення (6) у організації o_1 . Найгірший ваговий коефіцієнт за параметром p_9 організації o_1 :

$$g_1 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \right) = \left(\frac{6}{6 + 10 + 7 + 9 + 10 + 7} \right) = 0,122.$$

Згідно (6.8), вагові коефіцієнти інших організацій:

$$g_1 = R_1 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 6 \cdot 0,122 / 6 = 6 \cdot 0,0203 = 0,122;$$

$$g_2 = R_2 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 10 \cdot 0,0203 = 0,203; \quad g_3 = R_3 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 7 \cdot 0,0203 = 0,142;$$

$$g_4 = R_4 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 9 \cdot 0,0203 = 0,183;$$

$$g_5 = R_5 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 10 \cdot 0,0203 = 0,203;$$

$$g_6 = R_6 \cdot g_1 \cdot R_1^{-1} = 7 \cdot 0,0203 = 0,142;$$

За допомогою (6.5), (6.6) та визначених коефіцієнтів ваги для всіх організацій і всіх прийнятих параметрів оцінювання, записуємо нечіткі множини, що інтегрально характеризують універсальні нечіткі множини організацій, які забезпечують ТО і Р багатоцільових АПА:

$$\dot{p}_1 = \left\{ \frac{0,093}{o_1}, \frac{0,162}{o_2}, \frac{0,116}{o_3}, \frac{0,208}{o_4}, \frac{0,186}{o_5}, \frac{0,232}{o_6} \right\};$$

$$\begin{aligned} \dot{p}_2 &= \left\{ \frac{0,175}{o_1}, \frac{0,175}{o_2}, \frac{0,2}{o_3}, \frac{0,125}{o_4}, \frac{0,15}{o_5}, \frac{0,175}{o_6} \right\}; \\ \dot{p}_3 &= \left\{ \frac{0,2}{o_1}, \frac{0,177}{o_2}, \frac{0,177}{o_3}, \frac{0,155}{o_4}, \frac{0,155}{o_5}, \frac{0,133}{o_6} \right\}; \\ \dot{p}_4 &= \left\{ \frac{0,214}{o_1}, \frac{0,214}{o_2}, \frac{0,192}{o_3}, \frac{0,12}{o_4}, \frac{0,168}{o_5}, \frac{0,095}{o_6} \right\}; \\ \dot{p}_5 &= \left\{ \frac{0,153}{o_1}, \frac{0,135}{o_2}, \frac{0,171}{o_3}, \frac{0,19}{o_4}, \frac{0,19}{o_5}, \frac{0,153}{o_6} \right\}; \\ \dot{p}_6 &= \left\{ \frac{0,24}{o_1}, \frac{0,168}{o_2}, \frac{0,24}{o_3}, \frac{0,048}{o_4}, \frac{0,072}{o_5}, \frac{0,24}{o_6} \right\}; \\ \dot{p}_7 &= \left\{ \frac{0,16}{o_1}, \frac{0,14}{o_2}, \frac{0,16}{o_3}, \frac{0,18}{o_4}, \frac{0,16}{o_5}, \frac{0,20}{o_6} \right\}; \\ \dot{p}_8 &= \left\{ \frac{0,23}{o_1}, \frac{0,207}{o_2}, \frac{0,207}{o_3}, \frac{0,046}{o_4}, \frac{0,207}{o_5}, \frac{0,092}{o_6} \right\}; \\ \dot{p}_9 &= \left\{ \frac{0,122}{o_1}, \frac{0,203}{o_2}, \frac{0,142}{o_3}, \frac{0,183}{o_4}, \frac{0,203}{o_5}, \frac{0,142}{o_6} \right\}. \end{aligned}$$

Результатом перетину [146] нечітких множин

$$\bigcap P = \{ \dot{p}_1 \cap \dot{p}_2 \cap \dot{p}_3 \cap \dot{p}_4 \cap \dot{p}_5 \cap \dot{p}_6 \cap \dot{p}_7 \cap \dot{p}_8 \cap \dot{p}_9 \},$$

відповідно до виразів (6.1), (6.2) та (6.3) є нечітка множина

$$\bigcap P = \left\{ \frac{0,093}{o_1}, \frac{0,135}{o_2}, \frac{0,116}{o_3}, \frac{0,046}{o_4}, \frac{0,072}{o_5}, \frac{0,092}{o_6} \right\}.$$

Останній вираз містить значення ступенів приналежності організацій до найкращого інтегрального значення. Згідно (6.6), рейтинги організацій, що забезпечують ТО і Р багатоцільових АПА розподілені наступним чином (табл. 6.5, рис. 6.1).

Таблиця 6.5 – 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

Продовження таблиці 6.5

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

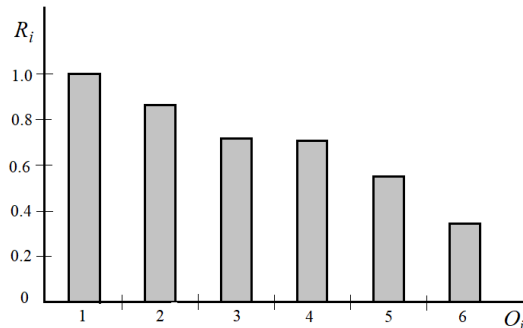


Рисунок 6.1 – Діаграма розподілу результуючих рейтингів організацій щодо забезпечення ТО і Р багатоцільових АПА

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

6.2 Загальні методи рішення задач багатокритеріальної оптимізації при синтезі конструкцій СТС

При прогнозуванні безпечних систем (БС) або плануванні в них перехідних процесів доводиться мати справу з великими математичними моделями, які містять значну кількість ступенів свободи, описуються системами диференціальних рівнянь високого порядку, а тому розрахунок одного варіанту на ПЕОМ вимагає тривалого часу. Це означає, що своєчасно вирішити задачу багатокритеріальної оптимізації в повному обсязі не завжди можливо. Тому вона поділяється методами системного аналізу на підсистеми, які можливо оптимізувати, а потім методами системного синтезу результати оптимізації потрібно з'єднати або об'єднати з тим, щоб отримати інтегральне

оптимальне рішення для всієї системи. Все це повинно дозволити визначити такі вимоги до підсистем, щоб поведінка системи була оптимальною.

Методика рішення задач багатокритеріальної оптимізації передбачає наявність математичної моделі або моделей процесів, або поведінки, або моделей процесів, або поведінки всієї системи, яка включає основні етапи системного аналізу у вигляді постановки, побудови і вирішення [218].

На етапі постановки задачі здійснюється обрис кордонів досліджуваної системи, 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.

Обрис кордонів системи проводиться трьома видами обмежень: параметричними, функціональними та критеріальними.

Параметричні обмеження мають вигляд наступної нерівності:

$$\alpha_j^* \leq \alpha_j \leq \alpha_j^{**}, \quad j = \overline{1, r}. \quad (6.9)$$

Функціональні обмеження записуються аналогічно у вигляді нерівності:

$$c_\ell^* \leq f(\alpha) \leq c_\ell^{**}, \quad \ell = \overline{1, t}. \quad (6.10)$$

Критеріальні обмеження являють собою локальні критерії якості виду:

$$\Phi_v(\alpha) \leq \Phi_v^{**}, \quad v = \overline{1, k} \quad (6.11)$$

або
$$\Phi_v(\alpha), \quad v = \overline{1, k}, \quad (6.12)$$

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

У задачах із суперечливими критеріями важко сформулювати жорсткі критеріальні обмеження Φ_v^{**} , а іноді і нежорсткі функціональні c_ℓ^*, c_ℓ^{**} і параметричні $\alpha_j^*, \alpha_j^{**}$ обмеження. Тому правильність постановки задачі багатокритеріальної оптимізації багато в чому залежить від досвіду і передбачення дослідження і носить суб'єктивний характер.

Перераховані обмеження (6.9)–(3.12) виділяють допустиму множину D , що представляє варіанти рішень α^i , які задовольняють цим обмеженням.

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 у вигляді ієрархічної структури. Нижній рівень цієї структури становлять підсистеми, а верхній – система в цілому. У багатьох випадках оптимізація на нижньому рівні виявляється простішою, якщо використовувати такі умови взаємодії локальних критеріїв з глобальними як:

– у підсистемі можуть бути критерії, які неявним чином впливають на критерії всієї системи, а тому вони можуть бути відсутні в списку критеріїв всієї системи;

– у системі можуть бути критерії, які на рівні підсистем неможливо розрахувати;

– 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.

Відомі аналогічні (варіантам) 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 кожную 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 методичний підхід до багатокритеріальної оптимізації характерний для лінійних і нелінійних систем руху, а також систем енергоресурсозбереження морських транспортних засобів різного призначення.

6.2.1. Метод підтримки прийняття «компромісних рішень» при синтезі складних технічних систем різного призначення

Для більшості СТС, особливо багатоцільового призначення характерні суперечності у вимогах, наприклад, мінімальна вартість і необхідність забезпечення максимальної енергоефективності системи, надійність системи і її масогабаритні показники, а також інші суперечливі, іноді взаємовиключні, вимоги. Економічність, керованість, швидкодія, маса, габарити, ціна, екологічність, надійність, простота експлуатації та технічного обслуговування і ремонту, ергономічність, функціональність і інші вимоги, що пред'являються до СТС, практично завжди вступають між собою у протиріччя.

Наприклад, при синтезі такої складної технічної конструкції, як електричний двигун електрорушії АПА необхідно урахувати, що [187]:

- а) при заданій номінальній потужності електромагнітні навантаження визначають ступінь використання активних матеріалів і розміри двигуна;
- б) при заданій частоті обертання валу, чим більше електромагнітні навантаження, тим менше розміри і вартість двигуна;
- в) геометричні розміри двигуна визначають її електромагнітний момент.

Таким чином, при рівній потужності, електричні машини з більш високою частотою обертання валу мають менші габарити і масу. При синтезі електрорушії це потребує встановлення редуктора. Уподобання при синтезі електричного двигуна у бік збільшення активних матеріалів (мідь обмоток, тип, вміст кремнію і товщина електротехнічної сталі), перетину провідників, класу ізоляції, визначають високу його енергетичну ефективність, але вступають у протиріччя з масогабаритними показниками і ціною. Проглядається очевидне протиріччя – чим менше активних матеріалів використано у конструкції, тим вона дешевше, але техніко-експлуатаційні характеристики – гірше.

Традиційний синтез СТС використовує два основних принципи: перший, заснований на оптимізації (пошуку мінімаксного значення) будь-

якого критерію для окремих параметрів або параметра системи, другий, заснований на згортці прийнятих приватних критеріїв і оцінює можливі варіанти (альтернативи) за інтегральним критерієм якості [208].

Принципова складність задач вибору при багатьох критеріях якості [209, 218] полягає у апріорі неможливому знаходженні «найкращого» рішення. Невелика зміна умов і вимог, при яких синтезується система, що складається з безлічі різних елементів, призводить до зміни суті оптимізаційного синтезу. Останні розробки [15, 146, 208] у області автоматизації прийняття рішень і автоматизованого проектування (зокрема – САПР) підтверджують непродуктивність застосування у ході вирішення задач багатокритеріального оптимізаційного синтезу традиційних прийомів, аналогічних використовуваним у задачах однокритеріальної оптимізації, де функція мети приймає мінімаксне значення.

У даний час відомий альтернативний підхід до синтезу складних систем, що не вимагає однозначного встановлення критерію оптимальності чи функції мети [154, 169]. Цей підхід заснований на використанні принципу Еджворта–Парето і нерідко інтерпретується у термінах відносної важливості критеріїв якості [168, 204].

Згідно [205] «будь-який вибір, що підпорядковується набору аксіом, які характеризують поведінку особи, приймаючої рішення (ОПР) у процесі прийняття рішень, слід здійснювати у межах множини Парето, яку можна побудувати за допомогою «нового» векторного критерію, що визначається на основі «старого» векторного критерію та наявної кількісної інформації». Більш просто цей принцип можна охарактеризувати наданням можливостей звуження початкової множини Парето за допомогою встановлення відносної важливості (ваги) одного параметра або критерію перед іншим. Тут можна застосовувати теорію нечітких множин [15, 150] і методи експертних оцінок [107, 169, 209].

Використання інтегрального критерію якості (критерію оптимальності, функції мети) досить зручно з позицій автоматизованого проектування, однак від ОПР приховано процес пошуку варіантів, що не дозволяє змінювати

важливість параметрів, переваг вибору альтернатив. Крім того, аналіз такого підходу до синтезу систем показує, що часто він недостатньо обґрунтований і складний, якщо враховує другорядні чинники технологічного процесу, часто дає слабо аргументований результат.

Таким чином, якщо встановлено взаємні зв'язки і залежності параметрів системи, то необхідний перехід до багатокритеріального аналізу системи і ітеративному процесу її синтезу – з урахуванням встановлення ОПР відносної важливості (пріоритетів) обраних інтегральних критеріїв якості.

Пропонується здійснювати синтез найбільш ефективною за декількома прийнятими ОПР параметрами і обмеженнями системи [146, 169, 218] на основі інтегральних критеріїв якості [208] і з використанням принципу Еджворта–Парето [206, 207].

При синтезі складних систем різного призначення особливістю застосування принципу Еджворта–Парето полягає у тому, що, послаблюючи (змінюючи) вимоги до значущості (ваги) окремих критеріїв, у процесі синтезу знаходяться квазіоптимальні рішення тоді, коли вони не визначаються традиційними методами оптимізації. Такий синтез – евристичний, ітераційний, тобто ОПР, аналізуючи альтернативні варіанти побудови системи, порівнює їх, змінює вимоги і обмеження, приймає компромісні рішення, знову аналізує нові отримані альтернативні варіанти і т. д. У ітеративному процесі синтезу складної системи, ОПР змінює значимість окремих критеріїв на основі прийняття компромісів, причому процедура синтезу системи протікає в умовах, коли використовуються звичні, фізично зрозумілі параметри і значення обраних критеріїв.

У процесі синтезу ОПР не використовує окремі виграшні ситуації, засновані на критеріях для ряду альтернативних варіантів, а оцінює компромісні варіанти, наприклад, у ході діалогу з програмним середовищем. Ідея практичного використання представленої методики прийняття «компромісних рішень» полягає у наступному.

Нехай експертами [107, 208, 209] відібрані параметри синтезованої системи $\alpha_1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n$ і можливі складові елементи системи. Задача полягає у

тому, щоб відібрати «найкращим» чином комбінацію елементів системи, наприклад, за вартістю. Згідно принципу Еджворта–Парето, очевидне значення – мінімум сумарної вартості складових елементів, розглядається тільки як відправна точка для поліпшення інших функціоналів або критеріїв системи за рахунок прийняття компромісів, тобто – ослаблення вимог 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 параметра (при $i = 1, \dots, n$) і встановлює функціональні обмеження.

2. ОПР вводить функціонали (критерії) Φ_1, \dots, Φ_m , для яких необхідно знайти екстремум.

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 системи.

При аналізі сформованих таблиць з'являється можливість змінювати критеріальні обмеження. Це дозволить ОПР з'ясувати, який вииграш за

іншими параметрами дають деякі послаблення критеріїв і до чого може привести підвищення жорсткості обмежень.

Розглянемо послідовність прийняття «компромісних рішень» (яку можна використовувати при синтезі складних систем різного призначення), на простому прикладі синтезу СТС – аргументованому визначенні «найкращої» комбінації складових елементів конструкції пропульсивного комплексу транспортного засобу багатоцільового призначення – автономного плавального апарата [8, 176]. Ускладненість синтезу ПК такого АПА пов'язана також і з тим, що необхідний не тільки найбільш ефективний, за рядом параметрів, вибір складових його елементів, але узгодження і сумісність вибраних елементів комплексу. Неузгодженість при виборі співвідношень між технологічними та перетворюваними параметрами призводить до значного розкиду енергетичних, масогабаритних і експлуатаційних показників АПА.

У [8, 58, 101, 176] показано, що ПК такого багатоцільового АПА містить два елементи конструкції: електродвигун і редуктор (механічну передачу на гвинт). При заданій потужності механічної передачі, можлива безліч комбінацій пари «двигун – редуктор», які відповідають технологічним і тактико-технічним вимогам та забезпечують виконання основних функцій АПА.

Нехай експертами [107, 208, 209] відібрані основні технічні параметри елементів електрорушіїв АПА: номінальні потужність і момент на валу двигуна, його номінальна і максимальна частоти обертання і максимальний момент; передавальне число редуктора; ККД, маса і моменти інерції двигуна і редуктора. Оскільки моменти інерції редукторів J_p , ККД двигунів і редукторів близької потужності практично мало відрізняються, тому вони, з метою спрощення, з подальшого аналізу виключені. Параметри сумісних, попередньо обраних проектувальниками, двигунів і редукторів, будь-які комбінації яких можуть бути встановлені у ПК АПА наведені у табл. 6.6 і табл. 6.7. Значення коефіцієнтів перевантаження (λ_d, λ_p) максимального і мінімального моментів на валу (M_{\max} і M_{\min}), моментів холостого ходу (M_{x_d}, M_{x_p}) двигуна і редуктора у таблицях також не наведені, оскільки за їх допомогою проектувальниками

проводилась лише встановлення можливості застосування обраних двигунів і редукторів задовольнити вимогам технологічного режиму роботи ПК АПА.

Таблиця 6.6 – Параметри електродвигунів ПК АПА

Двигун	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$M_{\text{ном}}$, 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

З представлених у таблицях 6.6 і 6.7 даних видно, що можна одержати 40 можливих варіантів задовільних рішень і при цьому будуть отримані різні техніко-експлуатаційні та техніко-економічні показники. 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.

Таблиця 6.7 – Параметри редукторів електрорушіїв

Редуктор	I	M , Нм	m_p , кг	V_p , см ³	C_p , у. о.
P1	2–8,0	1000	75	$33,0 \cdot 10^{-3}$	58,0
P2	2–8,25	800	70	$32,0 \cdot 10^{-3}$	54,8
P3	2–8,24	900	80	$34,4 \cdot 10^{-3}$	57,0
P4	1,8–8,0	660	84	$32,9 \cdot 10^{-3}$	55,6
P5	2–8,0	500	75	$22,6 \cdot 10^{-3}$	60,7

Якщо елементів, що утворюють систему буде не два («двигун – редуктор»), а більше, з відповідною номенклатурою і параметрами, то очевидно, що «вручну» найкращу одночасно за кількома критеріями комбінацію таких елементів знайти практично неможливо. Розглянемо більш детально послідовність використання методу.

У якості варійованих параметрів приймаємо наступні:

$$a_1 = P_{\text{ном}} - \text{номінальна потужність двигуна, кВт};$$

$a_2 = n_{\text{НОМ}}$ – 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;

$a_6 = \text{СТ}_{\text{ДВ}}$ – вартість двигуна, у.о.;

$a_7 = m_{\text{р}}$ – маса редуктора, кг;

$a_8 = \text{СТ}_{\text{р}}$ – вартість редуктора, у.о.;

$a_9 = i$ – передавальне число редуктора.

Послідовність прийняття рішень для ОПР, наступна.

1. Наводяться (табл. 6.8) визначені максимальне і мінімальне значення відібраних параметрів ($a_{j \min} < a_j < a_{j \max}$, де $j = 1, \dots, n$).

Таблиця 6.8 – Значення параметрів елементів

j	$a_{j \min}$	$a_{j \max}$	a_{1j}	a_{2j}	a_{3j}	a_{4j}	a_{5j}	a_{6j}	a_{7j}	a_{8j}	a_{9j}
1	1,10	1,50	1,25	1,20	1,40	1,15	1,50	1,50	1,20	1,10	1,40
2	1000	2240	1000	1500	1000	2200	1500	2240	2200	1000	1000
3	4,99	14,00	11,90	7,80	13,60	4,99	9,60	6,40	5,20	10,50	14,00
4	0,011	0,188	0,017	0,025	0,046	0,014	0,014	0,017	0,011	0,013	0,188
5	33	97	61	91	97	74	52	61	41	33	88
6	182	312	247	239	312	261	234	272	182	220	500
7	70	84	75	70	80	84	75	75	70	80	75
8	54,8	60,7	58,0	54,8	57,0	55,6	60,7	58,0	54,8	57,0	58,0
9	1,0	4,5	2,0	3,0	2,0	4,4	3,0	4,48	4,4	2,0	2,0

Далі накладаються і перевіряються функціональні обмеження (на статичний M_c і максимальний M_{\max} моменти, прискорення і т. д.):

$$M_{\text{НОМ}} > M_c, \quad \lambda \cdot M_{\text{НОМ}} > M_{\max}, \quad M_{\min} > M_{\text{ХХ}}.$$

Підкреслимо, що всі обмеження і нерівності були використані проектувальниками раніше – для попередньої перевірки [83] обраних двигунів і редукторів, тому всі параметри з табл. 6.6, табл. 6.7 і, відповідно, табл. 6.8, задовольняють функціональним обмеженням і придатні для подальшого аналізу.

2. Якість [107, 208, 209] кожного варіанту конструкції ПК оцінює ОПР за п'ятьма критеріями (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:

$$\Phi_1 = a_5 + a_7 - \text{сумарна маса};$$

$$\Phi_2 = a_6 + a_8 - \text{сумарна вартість};$$

$$\Phi_3 = (M_{\max} - M_{\text{хх}} \cdot i) / J_{\text{пр}} - \text{максимальне прискорення при розгоні ПК};$$

$\Phi_4 = (J_{\text{пр}} \cdot n_{\text{ном}}) / (M_{\max} - M_{\text{хх}} \cdot i) - \text{мінімальний час перехідних процесів, що визначає динаміку ПК АПА};$

$\Phi_5 = 0,5 \cdot J_{\text{пр}} \cdot n_{\text{ном}}^2 - \text{запас кінетичної енергії, що визначає енергоефективність системи у динаміці};$

$J_{\text{пр}} = (J_{\text{дв}} + J_{\text{р}}) - \text{сума моментів інерції двигуна і редуктора, де значення } J_{\text{р}} \text{ прийнято постійним (0,01 кг}\cdot\text{м}^2) \text{ для всіх варіантів.}$

3. Складається таблиця, альтернативних варіантів для кожного з функціоналів (табл. 6.9, перші 25 варіантів системи із 40 можливих). Значення функціоналів розміщуємо за зростанням (крім функціоналу Φ_3 , який сортується за спаданням). У даному прикладі всі розрахунки проведені за допомогою *Microsoft Office Excel*. З розрахованих раніше (запропонованих як задовільні) варіантів, за рахунок порівняно невеликих відхилень від параметрів існуючого набору (моделі ПК), ОПР визначає найбільш вигідні комбінації.

4. ОПР з'ясовує існування комбінацій пари «двигун – редуктор», не гірших, ніж у прийнятому попередньо вихідному за всіма п'ятьма функціоналами варіанті. У найбільш загальному випадку, вихідний варіант можна прийняти довільно, наприклад, методом рівномірно-розподіленої послідовності, але краще, заздалегідь визначити реперну точку за критерієм мінімаксу. ОПР у якості критеріальних обмежень обрані значення у точці 1.

Таблиця 6.8 – Значення функціоналів за варіантами комбінацій елементів ПК

i	Φ_1	i	Φ_2	i	Φ_3	i	Φ_4	i	Φ_5
17	103	7	236,8	5	2946	8	28,0	8	82,7
21	108	24	237,6	14	2946	17	28,0	17	82,7
7	111	16	239,0	20	2946	24	28,0	21	82,7

Продовження таблиці 6.8

8	113	22	240,0	25	2946	21	28,0	24	82,7
22	116	17	274,8	1	2831	19	33,5	1	104,7
16	121	8	277	13	2831	23	33,5	9	104,7
20	122	21	278	19	2831	13	33,5	13	104,7
24	125	20	288,8	23	2831	1	33,5	19	104,7
5	127	14	289,6	8	2738	5	49	23	104,7
19	131	25	291	17	2738	14	49	18	104,7
25	132	2	293,6	21	2738	20	49	5	184,9
14	136	5	294	24	2738	25	49	14	184,9
6	136	10	294,7	6	2127	7	97,5	20	184,9
1	136	19	301,8	15	2127	16	97,5	25	184,9
23	141	13	302,6	7	1732	22	97,5	3	264,6
15	141	23	304	16	1732	11	123,5	11	264,6
13	145	1	305	22	1732	3	123,5	7	291,9
12	152	4	316,6	4	883	6	124,6	22	291,9
18	154	12	318	12	883	15	124,6	16	291,9
4	158	15	329	2	753	2	174,4	2	320,0
2	161	6	330	10	753	10	174,4	10	320,0
9	163	11	366,8	3	731	12	215,5	4	371,5
10	166	3	368	11	731	4	215,5	12	371,5
11	167	18	554,8	9	412	9	237,0	6	467,7
3	177	9	558	18	412	18	237,0	15	467,7

З аналізу табл. 6.8, видно, що існує тільки одна така не найгірша точка – 19: значення Φ_1 і Φ_2 у точці 19 кращі ($\Phi_{1-19} = 131 < \Phi_{1-1} = 136$ і $\Phi_{2-19} = 301,8 < \Phi_{2-1} = 305$), а за іншими критеріями однакові (див. табл. 6.8). Це «оптимальний» варіант відносно точки 1, проте він за всіма критеріями водночас не покращений. ОПР приймає компроміс – послабити вимоги за функціоналами Φ_4 і Φ_5 , тобто обрати обмеження $\Phi_4 = 49$ і $\Phi_5 = 184,9$ при незмінних вимогах до Φ_1 , Φ_2 і Φ_3 .

У допустимий діапазон для аналізу (відносно точки 1) потрапило вже 4 точки: 5, 14, 20 і 25. Видно, що можливе покращення конструкції відносно точки 1 відразу за трьома функціоналами: Φ_1 – на 10,3 %, Φ_2 – на 5,3 %, Φ_3 – на 4 %. У третій ітерації ОПР вирішено знайти точки, які по одному з функціоналів дещо гірше, ніж точка 1, але за іншими – краще.

Для цього обрано обмеження $\Phi_3 = 2738$, значення інших функціоналів

не змінюється ($\Phi_4 = 49$, $\Phi_5 = 184,9$). Тут у допустимий діапазон для аналізу потрапляє 10 точок, серед яких (що очевидно), віддається перевага точкам 8, 17, 24. У точці 17 значення Φ_1 мінімальне і краще (на 24,2 %), ніж для точки 1. Значення функціоналів Φ_4 і Φ_5 для точки 17 краще, ніж для точки 1, відповідно на 16,4 і 21,0 % (див. табл. 6.9 і 6.10).

Наступний ітераційний аналіз суттєво кращих результатів не дає без значного погіршення критеріїв.

Таблиця 6.9 – Координати «компромісних» точок

j	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
1	1,25	1000	11,9	0,017	61	247	75	58,0	2
17	1,1	1000	10,5	0,013	33	220	70	54,8	2
20	1,5	1500	9,6	0,014	52	234	70	54,8	3
19	1,25	1000	11,9	0,017	61	247	70	54,8	2

Таблиця 6.10 – Значення функціоналів

i	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5
1	136	305,0	2831	33,5	104,7
17	103	274,8	2738	28,0	82,7
19	131	301,8	2831	33,5	104,7
20	122	288,8	2946	49,0	184,9

Очевидно, що наведений метод потребує від ОПР ретельного аналізу. Подальшим його розвитком є встановлення вагових коефіцієнтів 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 «непокрещуваний» варіант, навіть якщо він не матиме найкращі показники за іншими функціоналами. У такому випадку у дію вступає ОПР і з кількох вищих за списком варіантів обирає найбільш прийнятний. Алгоритм визначення варіанту у такому випадку наступний.

1. Переписуємо 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. 6.11).

Таблиця 6.11 – Вихідна таблиця функціоналів по варіантах

<i>i</i>	Φ_1	<i>i</i>	Φ_2	<i>i</i>	Φ_3	<i>i</i>	Φ_4	<i>i</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. Проводиться сортування кожної пари стовпців (номера за списком і самого функціоналу) за зростанням (або зменшенням) відповідно до уподобань до функціоналу. При цьому додається ще один стовець у який записується вага функціоналу (P_{Φ}), що відповідає номеру сортування самого функціоналу (див. табл. 6.12).

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. 6.13).

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

Таблиця 6.12 – Пересортована таблиця за значеннями функціоналів з визначенням їх ваги

<i>i</i>	P_{Φ_1}	Φ_1	<i>i</i>	P_{Φ_2}	Φ_2	<i>i</i>	P_{Φ_3}	Φ_3	<i>i</i>	P_{Φ_4}	Φ_4	<i>i</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 6.13 – Визначення сумарної ваги функціоналів по варіантах

<i>i</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 варіанта, його функціонали та сумарна вага функціоналів, за якою і сортується таблиця (див. табл. 6.14).

Верхні значення відповідають отриманим раніше «компромісним» результатами. Як видно з табл. 6.14 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».

Таблиця 6.14 – Фінальна таблиця з сумою ваг функціоналів

<i>i</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
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

Отже, представлений метод підтримки прийняття рішень дозволяє вирішувати задачі синтезу складних систем різного призначення і знаходити варіант системи, непокращуваний («оптимальний») за кількома критеріями одночасно, але з незначним погіршенням інших. Подібним методом можна оптимізувати нові складні системи різного призначення, що синтезуються, де варійовані параметри можуть змінюватися у широких межах. Саме у цьому випадку можливості методу «компромісних рішень» мають переваги і розкриваються досить широко.

На прикладі синтезу конструкції СТС, знайдені можливі непокращувані варіанти ПК АПА. Параметри варіантів ПК АПА представлені у табл. 6.10, а у табл. 6.11 наведені значення критеріїв у цих точках:

- з редуктором типу Р3, який перевершує вихідний за критеріями маси (4 %) і вартості (1 %), та незначно гірший за іншими критеріями;

- оптимальний за критерієм прискорення (т. 20). Прискорення у цьому варіанті системи на 115 рад/c^2 більше, ніж у початковому, а маса і вартість менші, відповідно, на 14 кг і 16,2 у. о.

- з двигуном типу М8 і редуктором Р2, маса і вартість якого на 33 кг і 30,2 у. о. менше, ніж у вихідного. У цьому варіанті тільки значення прискорення (на 3,4 %) гірше (т. 17).

Результати наведеного прикладу підтримки прийняття компромісних рішень показують, що у даному випадку для ПК АПА можна суттєво знизити масогабаритні показники його елементів «двигун – редуктор» за рахунок несуттєвого зменшення енергетичних і динамічних показників ПК.

Використовуючи надані принципом Еджворта–Парето можливості ослаблення критеріальних обмежень та наведений метод, можна автоматизувати отримання найкращих, з можливої множини альтернативних варіантів, параметри для будь-якої складної системи.

6.3 Висновки до розділу 6

1. Запропоновано процедуру забезпечення багатоцільового АПА «найкращим» із можливих варіантів технічним обслуговуванням і ремонтом, яка заснована на інтегральних методах експертного оцінювання. Наведено послідовність інтегрованої оцінки організацій, які пропонують послуги ТО і Р. Відмінність представленого методу від відомих є в удосконаленні процедури розрахунку різнорідних інтегрованих показників, які оцінюють якість рішень (проектів, продукції, обладнання, тендерних пропозицій тощо) і заснований на адитивному використанні методів кваліметрії, експертних оцінок і лінгвістичних висловлювань – методах нечіткої логіки.

2. Доведена можливість: а) формулювання цілеспрямованих вказівок розробникам, проектувальникам та ремонтно-експлуатаційним службам і організаціям подальшого покращення окремих показників запропонованих рішень; б) доказового і аргументованого відбору найкращих, із декількох можливих, варіантів закупівель обладнання, комплектуючих, матеріалів, відбору виконавців проектування, створення, ТО і Р багатоцільових АПА і інших типів СТС.

3. Представлений метод формалізований і реалізовано у середовищі *Microsoft Excel*, апробований низкою тестових прикладів та використаний під час аван-проекування суден багатоцільового призначення у Національному університеті «Одеська морська академія», Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова та Військовій академії (м. Одеса).

4. Удосконалено загальний метод підтримки прийняття рішень, що дозволяє вирішувати задачі синтезу складних систем різного призначення і знаходити варіант системи, непокращуваний («оптимальний») за кількома критеріями одночасно, але з незначним погіршенням інших. Подібним методом можна оптимізувати нові складні системи різного призначення, що синтезуються, де варійовані параметри можуть змінюватися у широких межах. Саме у цьому випадку можливості методу «компромісних рішень» мають переваги і розкриваються досить широко.

2. Передбачається застосування пропонованих методів у таких СППР, де використовуються специфічні оцінки технічних, технологічних, еколого-економічних проектів, показників, продукції багатоцільового призначення, спеціальних транспортних засобів, а також під час проведення тендерних закупівель, під час вирішення завдань забезпечення ТО і Р, організації еколого-економічних експертиз, тощо.

3. На прикладі синтезу конструкції СТС, знайдені можливі непокращувані варіанти ПК АПА. Варіанти ПК АПА представлені у табл. 6.9, а у табл. 6.10 наведені значення критеріїв у цих точках: а) з редуктором типу Р3, який перевершує вихідний за критеріями маси (4 %) і вартості (1 %), та незначно гірший за іншими критеріями; б) оптимальний за критерієм прискорення (т. 20). Прискорення у цьому варіанті системи на 115 рад/с² більше, ніж у початковому, а маса і вартість менші, відповідно, на 14 кг і 16,2 у. о.; в) з двигуном типу М8 і редуктором Р2, маса і вартість якого на 33 кг і 30,2 у. о. менше, ніж у вихідного. У цьому варіанті тільки значення прискорення (на 3,4 %) гірше (т. 17).

4. Використовуючи надані принципом Еджворта–Парето можливості ослаблення критеріальних обмежень та наведений метод, можна автоматизувати отримання найкращих, з можливої множини альтернативних варіантів, параметри для будь-якої СТС. Результати наведеного прикладу підтримки прийняття компромісних рішень показують, що для електрорушіїв АПА можна суттєво знизити масогабаритні показники його елементів «двигун – редуктор» за рахунок несуттєвого зменшення загальних енергетичних і динамічних показників.

Основні наукові результати розділу опубліковано в [8, 15].

РОЗДІЛ 7

РОЗРОБКА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО МОДЕЛЮЮЧОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОРУШІВ БАГАТОЦІЛЬОВИХ АПА

7.1 Розробка навчально-дослідницького засобу «Стенд випробувальний СВ-1» у складі спеціалізованого моделюючого комплексу

Значна частина досліджень електромеханічних систем різного типу проводиться методами математичного моделювання, найчастіше з використанням середовищ *Matlab* і *Mathcad* [153, 174]. Нестача апріорної інформації та допущення, прийняті при описі блоків у цих системах, призводять до зниження точності результатів моделювання [113, 234]. Для зведення до мінімуму впливу допущень на якість процесів управління, необхідно проводити верифікацію математичних моделей за допомогою експериментів на конкретній системі або на натурній фізичній моделі. У ході дослідження, з цією метою, розроблено спеціалізований моделюючий комплекс (СМК), до складу якого входить навчально-дослідницький лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1», призначений для дослідження ефективності АСК електроприводами постійного або змінного струму рушійно-стернових комплексів АПА, у тому числі – автономних підводних апаратів і спеціалізоване програмне забезпечення (ПЗ) до нього [18, 30, 149, 251]. За допомогою цього стенду здійснюється оцінка і ідентифікація параметрів електрорушійних пристроїв, подальша верифікація математичних моделей, імітується і досліджується робота різних електромеханічних пристроїв. Фотографії створеного СМК наведені у додатку Д.

«Стенд випробувальний СВ-1» складено із наступних блоків:

– електромеханічний блок, що включає електричні машини для випробувань і навантаження;

– силовий блок 1, призначений для живлення машини для випробувань.

Може використовуватися джерело з регульованою частотою і напругою

живлення для асинхронних або синхронних двигунів, або джерело регульованої постійної напруги для машин постійного струму;

- силовий блок 2 – містить джерело регульованої постійної напруги для живлення машини навантаження;

- вимірювальний блок з датчиками швидкості, кута положення, струму, напруги, температури;

- блок сполучення у вигляді плати вводу-виведення *PCI-1711L* фірми *Advantech* [253] та спеціального ПЗ, призначений для зв'язку вимірювального блока, силових блоків 1 і 2 з ПЕОМ;

- блок керування, який включає ПЕОМ.

Загальну функціональну схему створеного стенда наведено на рис. 7.1.



Рисунок 7.1 – Функціональна схема «Стенда випробувального СВ-1»

Розподіл на канали – машини (електродвигуна) для випробувань та машини навантаження обумовлений необхідністю уніфікації модулів і зниженням впливу однієї машини на іншу. Спеціальний периферійний модуль (СПМ) складається із блока сполучення з ПЕОМ, блока керування, силового блока (СБ), блока виміру. Схему СПМ представлено на рис. 7.2.

СПМ дозволяє вводити у ПЕОМ сигнали зворотних зв'язків і виводити керуючий сигнал. Основним елементом СПМ є мікроконтролер *Microchip*

PIC18F2431(DD1). Вибір мікроконтролера (МК) обумовлений наявністю у нього високопродуктивного АЦП і апаратного широтно-імпульсного модулятора (ШІМ) з розвиненими сервісними функціями.

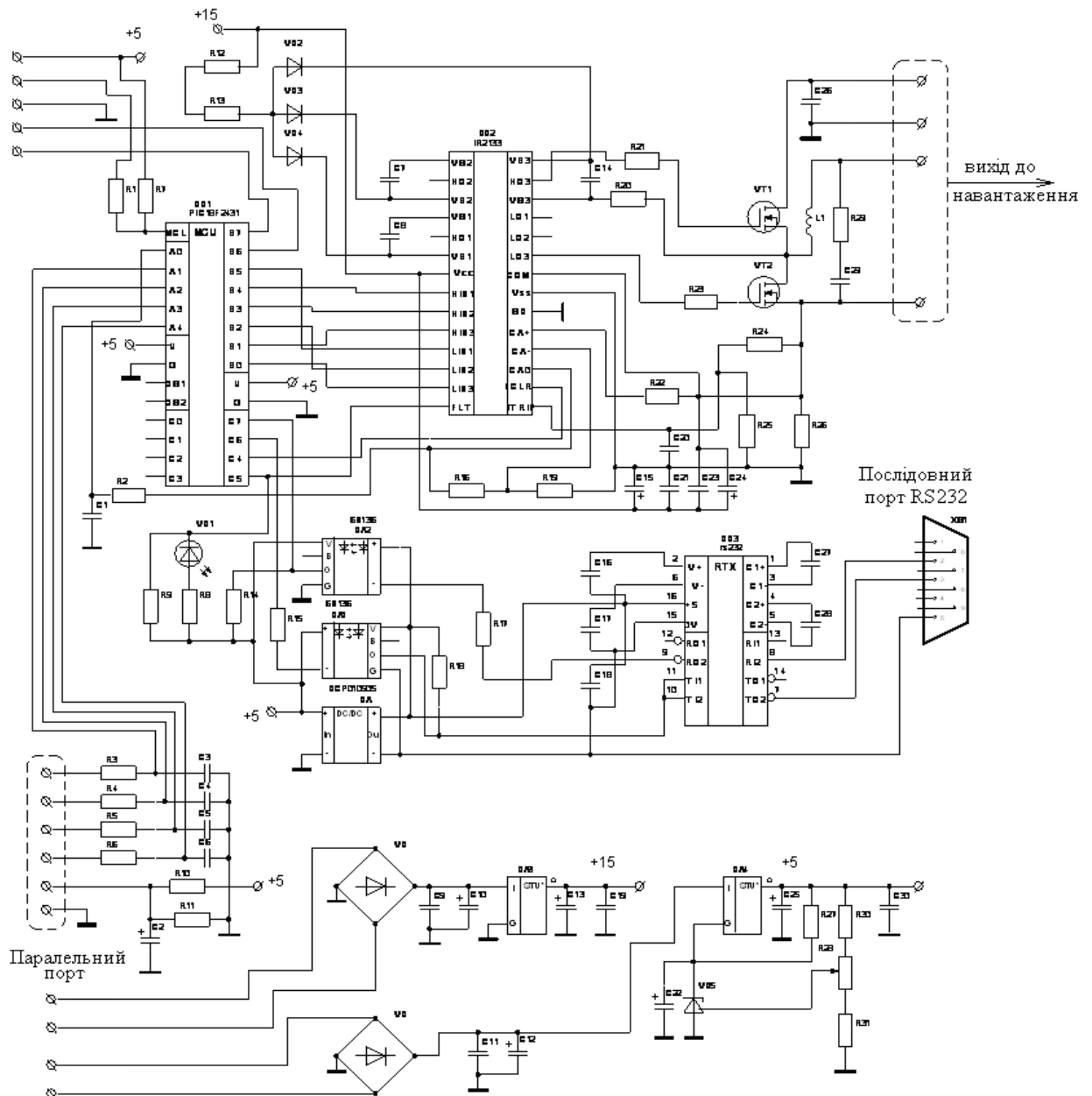


Рисунок 7.2 – Схема спеціального периферійного модуля

RC-фільтри встановлені перед аналоговими входами, призначені тільки для пригнічення високочастотних перешкод, основна фільтрація реалізується ПЗ МК. З виходів апаратного ШІМ сигнали подаються на драйвер *IR2133(DD2)*, який керує силовими транзисторами і здійснює захисні функції (коротке замикання, перегрів, перетворює напругу живлення ланцюгів керування). Вихідний силовий каскад є імпульсним регулятором знижуючого

типу (чоперна схема), у якому зворотний діод для підвищення ККД замінений на польовий транзистор. Силові транзистори типу *IRFP4710*, відрізняються дуже низьким опором каналу у відкритому стані (0,014 Ом).

На виході силового каскаду встановлено фільтр *L1-C29-R29*, призначення якого – обмеження швидкості наростання вихідної напруги для захисту ізоляції навантаження і пригнічення паразитних коливань у довгій лінії. Зв'язок з ПК здійснюється по паралельному інтерфейсу. Для забезпечення надійності та електробезпеки драйвер (*DD3*) гальванічно розв'язаний від основної схеми за допомогою швидкодіючих оптронів *DA1* і *DA2* *6N136*. Живлення драйвера забезпечується за допомогою *DC/DC*-перетворювача *DCP010505*. Живлення – два стабілізовані джерела 15 і 5 В. Оскільки джерело живлення 5 В використовується як опорне для АЦП, воно виконане як прецизійне, на основі стабілізатора *LM317* і джерела опорної напруги *TL431*.

Програмне забезпечення МК включає у себе ініціалізацію периферійних модулів: *USART*, АЦП, ШІМ і деяких інших [175]. Періодично викликається зв'язна процедура, яка пересилає у ПЕОМ виміряні і відфільтровані сигнали зворотних зв'язків, приймає керуючий байт і поміщає його у регістр керування шпаруватістю модулятора. Дані передаються у бінарному форматі, стартовий байт – 00.

Перед відправкою даних персональному комп'ютеру слід перетворити виміряні миттєві значення сигналів зворотного зв'язку у середні або такі, що діють за період або декілька періодів. Підпрограма цифрового фільтра виконана у двох варіантах.

Перший варіант – фільтр другого порядку з критичним загасанням. Вибір обумовлений декількома причинами: фільтр може бути реалізований за допомогою цілочислової арифметики, такий фільтр має високу якість перехідної характеристики. Для простоти обчислень реалізовано фільтр як дві ланки першого порядку, сполучені послідовно. Кожна ланка описана виразом

$$y_i = \frac{(K-1)y_{i-1} + x_i}{K},$$

де K – статичний коефіцієнт окремої ланки. Якщо прийняти $K = 2^n$, наприклад 256, і перетворити початковий вираз до виду

$$y_i = \frac{Ky_{i-1} - y_{i-1} + x_i}{K},$$

то при програмній реалізації можна обійтися тільки цілочисловим складанням, відніманням і зрушенням. Цей алгоритм змодельований у середовищі *Mathcad*. Перехідну характеристику фільтра при частоті дискретизації 10 кГц показано на рис. 7.3.

Для підвищення швидкодії системи розроблено другий варіант фільтра – «ковзне середнє». Щоб такий фільтр міг ефективно обчислювати середнє значення за період при нестабільній частоті сигналу, традиційний алгоритм модернізовано. Він отримав назву синхронний фільтр «ковзне середнє». Блок-схему алгоритму показано на рис. 7.4.

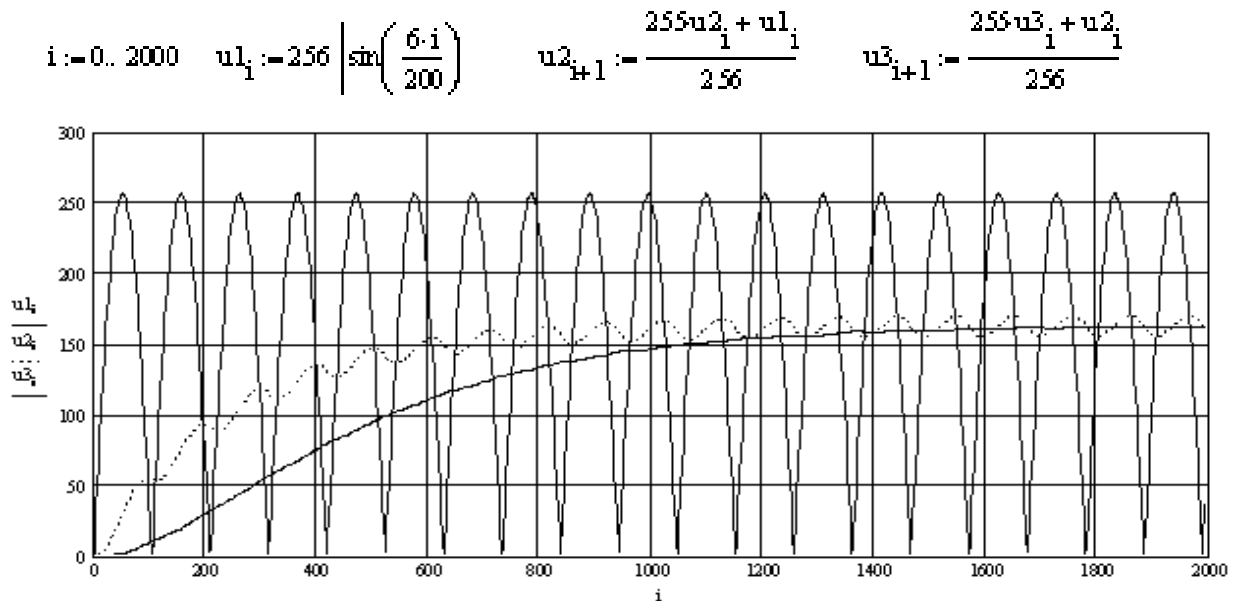


Рисунок 7.3 – Перехідна характеристика фільтра при частоті дискретизації 10 кГц: крива u_{1i} – досліджуваній сигнал; крива u_{2i} – сигнал після фільтра першого порядку; крива u_{3i} – сигнал після фільтра другого порядку

Частина алгоритму, яка здійснює попередню обробку (без ділення) і працює у перериванні, реалізована за допомогою програми (див. додаток В).

В основній програмі проводиться ділення накопиченої суми на кількість зроблених вимірів (лічильник). Оскільки МК не має апаратно

реалізованої операції ділення, для ділення використовується спеціальна підпрограма, особливістю якої є заміна ділення множенням на число, перетворене у додатковий код.

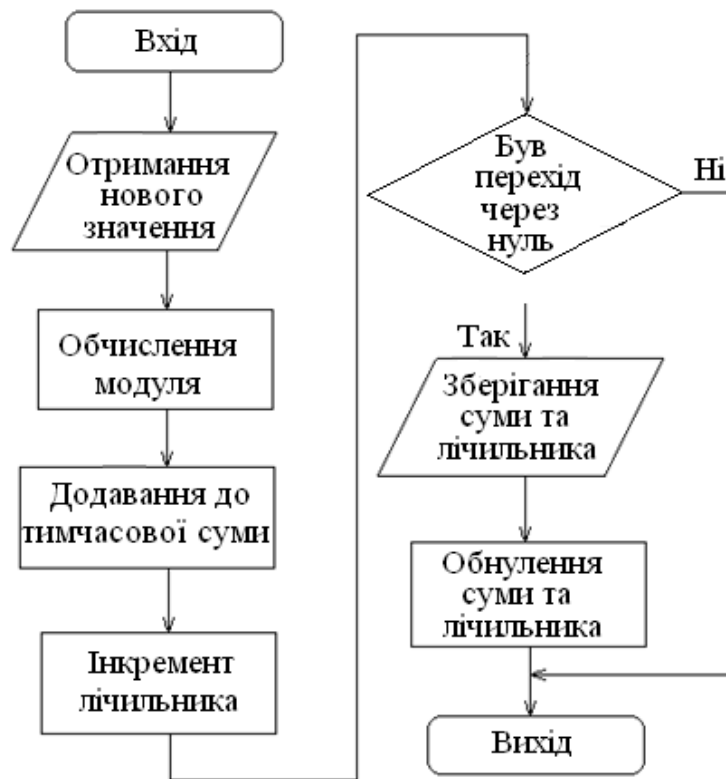


Рисунок 7.4 – Блок-схема алгоритму обчислень фільтру першого порядку

Загальний вигляд електромеханічної частини «Стенда випробувального СВ-1» представлено на рис. 7.5. Для забезпечення регульованого навантаження використовується асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (машина навантаження), включений у режим динамічного гальмування. Особливість машини навантаження полягає у тому, що ротор і статор можуть обертатися незалежно один від одного. Це забезпечується нерухомою перехідною опорою 3, на яку насаджено статор 2 через втулку на підшипниках кочення. Ротор має подовжений вал, що обертається на встановлених у нерухомій опорі підшипниках кочення. Штатні підшипники видалено із двигуна, що дозволило механічно розв'язати ротор і статор.

При виникненні моменту на валу двигуна пружний елемент електронних ваг 6, закріплений одним кінцем на основі 1, а іншим на статорі, створює момент опору і намагається повернути статор у початкове положення.

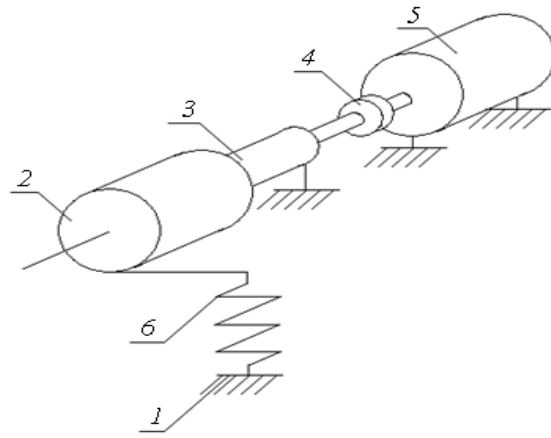


Рисунок 7.5 – Загальний вигляд електромеханічної частини «Стенда випробувального СВ-1»: 1 – фундамент; 2 – статор; 3 – нерухома перехідна опора; 4 – пружна муфта; 5 – машина для випробувань; 6 – пружний елемент електронних ваг

Ротор приводиться у обертання через пружну муфту 4 машиною для випробувань 5. При поданні постійної напруги на обмотки статора у них створюється електромагнітний момент, який намагається повернути статор у сторону, протилежну до обертання ротора до тих пір, поки зусилля пружного елемента 6, прикладене до корпусу статора, не урівноважить електромагнітний момент. На муфті з боку машини навантаження встановлено спеціальний датчик частоти обертання.

7.1.1. Розробка датчика виміру частоти обертання

Датчик виміру частоти обертання (тахогенератор) призначений для використання у «Стенді випробувальному СВ-1» як джерело сигналу зворотного зв'язку у складі керуючих і вимірювальних систем. Основні необхідні для досліджень електрорушіїв АПА технічні характеристики тахогенератора: максимальна частота обертання – 2000 об/хв; мінімальна частота обертання – 100 об/хв; напруга живлення – 5 В; частота дискретизації – 100 Гц; розрядність – 10 біт; діапазон аналогового вихідного сигналу – 0...5 В; тип цифрового вихідного сигналу – паралельний.

Інформація про частоту обертання може бути отримана різними методами, наприклад за допомогою аналогових тахогенераторів, індукційних

датчиків, дискретних датчиків. Застосування дискретних датчиків дозволяє легко перетворити інформацію в цифровий код, усунути похибки лінійності та чутливості, характерні для аналогових датчиків. При використанні дискретних датчиків можливо два методи перетворення: підрахунок імпульсів упродовж заданого часового інтервалу або вимір часового інтервалу між суміжними імпульсами та обчислення зворотної функції. Перший спосіб простіший у реалізації, але вимагає тривалого часу виміру. У разі, коли необхідно отримувати результати вимірів через короткі інтервали часу, слід використати другий спосіб, хоча це вимагає більш високої швидкодії вимірювальної схеми.

Як первинний датчик використано інкрементний енкодер, що містить диск із 60-ма отворами і спеціальну здвоєну оптопару з відкритим оптичним каналом *HOA 0901*. На частоті обертання 2000 об/хв отримана частота зміни отворів датчика 2 кГц. Для забезпечення роздільної здатності 10 біт потрібна частота розрахункових імпульсів не менше 2,048 МГц. На МК з традиційною тактовою частотою 20 МГц, у разі програмної реалізації, частота розрахункових імпульсів 2,048 МГц недосяжна, тому обраний мікроконтролер з апаратним інтерфейсом квадратурного енкодера *PIC18F2431*. Указаний інтерфейс дозволяє проводити виміри періоду слідування вхідних імпульсів апаратно, контролювати напрям обертання. Обрано частоту слідування розрахункових імпульсів 5 МГц. Обрано режим модуля зворотного зв'язку – інтерфейс квадратурного енкодера, режим виміру швидкості – включено, режим оновлення – чотирикратний, індексний сигнал – не використовується, коефіцієнт ділення схеми виміру швидкості – 4.

При такому налагодженні маємо одну подію виміру швидкості на один період енкодера. Для підвищення перешкодозахищеності включено внутрішній фільтр, принцип дії якого полягає у наступному: зміна сигналу буде оброблена, якщо рівень сигналу стабільний упродовж деякого часу (у даному випадку – 32 цикли). Послідовність команд ініціалізації інтерфейсу наступна:

Схему алгоритму роботи датчика виміру частоти обертання показано на рис. 7.7. На початку кожного циклу алгоритму у блоці 1 перевіряється, чи завершився інтервал часу, що відповідає частоті дискретизації. Якщо інтервал завершився, то переходимо у блок 2, у якому перевіряється, чи сталися за цей часовий інтервал події виміру швидкості. Якщо подій не було, то вважаємо, що частота обертання нижче мінімальної вимірюваної і може вважатися нульовою.

У блоці 3 відбувається обнулення швидкості. Далі здійснюється виведення отриманої величини. У блоці 4 виводиться аналоговий сигнал через ЦАП, у блоці 6 виводиться цифровий сигнал через розширювач портів.

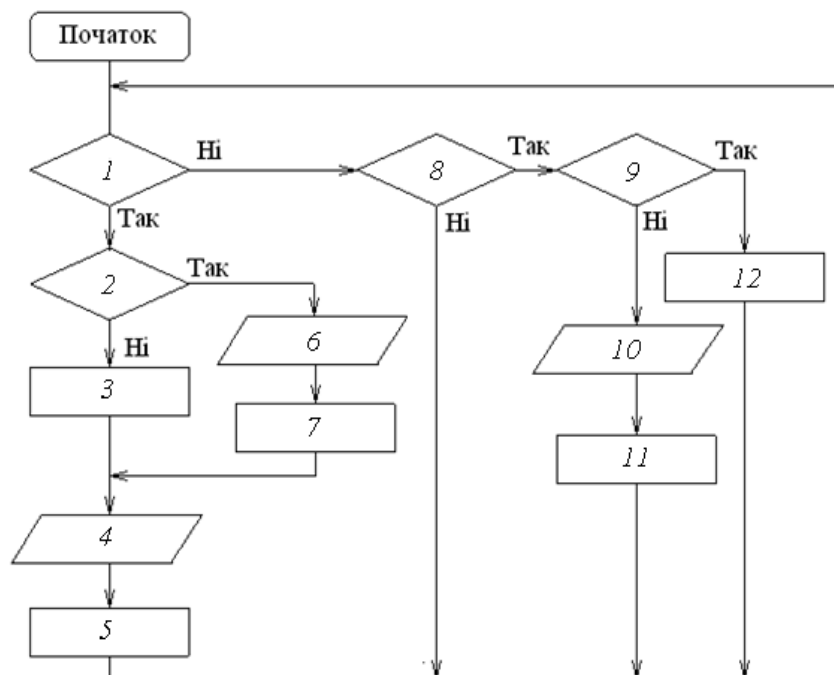


Рисунок 7.7 – Блок-схема алгоритму роботи датчика виміру частоти обертання електрорушіїв

Якщо при перевірці у блоці 2 з'ясувалося, що події виміру швидкості були, то здійснюється перехід до блоку 6, у якому обчислюється середнє значення тривалості періоду N_x , оскільки при високих частотах обертання подій вимірів швидкості за період дискретизації може статися більше одного. Далі у блоці 7 проводиться обчислення частоти обертання у обертах за хвилину. Якщо у блоці 1 з'ясувалося, що інтервал часу не завершився, то йде перехід до блоку 8 – перевірки події виміру швидкості. Якщо подія сталася, то у блоці 9 перевірка переповнювання таймера 5, яке показує, що частота

обертання занадто низька й виходить за вимірюваний діапазон. Якщо переповнювання не було, то у блоці 10 накопичується вимірювана величина, а у блоці 11 збільшується лічильник вимірів. Результати роботи блоків 10 і 11 використовуються у блоці 6 для обчислення середнього значення. У блоці 12 відбувається обнулення таймеру. Алгоритм працює циклічно, таким чином, пристрій функціонує весь час, поки подано живлення.

Для верифікації результатів теоретичних досліджень експериментами, уточнення математичних моделей систем управління електрорушійними АПА, проведено метрологічну атестацію розробленого навчально-дослідницького лабораторного засобу «Стенд випробувальний СВ-1». Додаткове призначення стенду – дослідження ефективності АСК електродвигунами різного роду струму електрорушійних АПА, у тому числі рушійно-стернових комплексів підводних апаратів. Комплект документації з метрологічної атестації навчально-дослідницького засобу «Стенд випробувальний СВ-1» представлено у додатку Б. Можливості створеного навчально-дослідницького лабораторного засобу наступні.

1. Використання оригінальної роз'ємної пружної муфти дозволяє за короткий час замінити одну машину для випробувань на іншу.

2. Діапазон потужностей електричних машин для випробувань складає від 0,25 до 1,0 кВт, швидкість обертання – до 2000 об/хв.

3. Блокове компонування дозволяє при використанні різного силового обладнання (живлення змінним або постійним струмом) створювати натурні моделі існуючих та перспективних для побудови електроприводів, відпрацьовувати вузли систем керування та АСК електрорушійними у цілому.

4. Наявність ПЕОМ дозволяє із мінімальними витратами часу синтезувати широкий спектр алгоритмів керування електрорушійними АПА та перевіряти ефективність їх функціонування на реальному електромеханічному обладнанні.

5. У ході досліджень визначається частота обертання машини для випробувань і обробляється на ПЕОМ. Діапазон виміру частоти обертання від 100 до 2000 об/хв з відносною похибкою не більше $\pm 2\%$.

7.1.2. Експериментальні дослідження динамічних характеристик цифрового тахогенератора

Для визначення динамічних характеристик розроблюваного пристрою у пакеті *Simulink* створена модель (рис 7.8), відповідно до рис 7.7, алгоритму обробки сигналу з частотою дискретизації, що відповідає використуваній у МК. На вхід *In1* подається досліджуваний сигнал – частота обертання, який перетворюється блоком 1 у послідовність імпульсів, що імітують формування вхідного сигналу вимірювача частоти обертання від оптичного датчика, встановленого нерухомо щодо диску із прорізами, який обертається на валу досліджуваного електродвигуна.

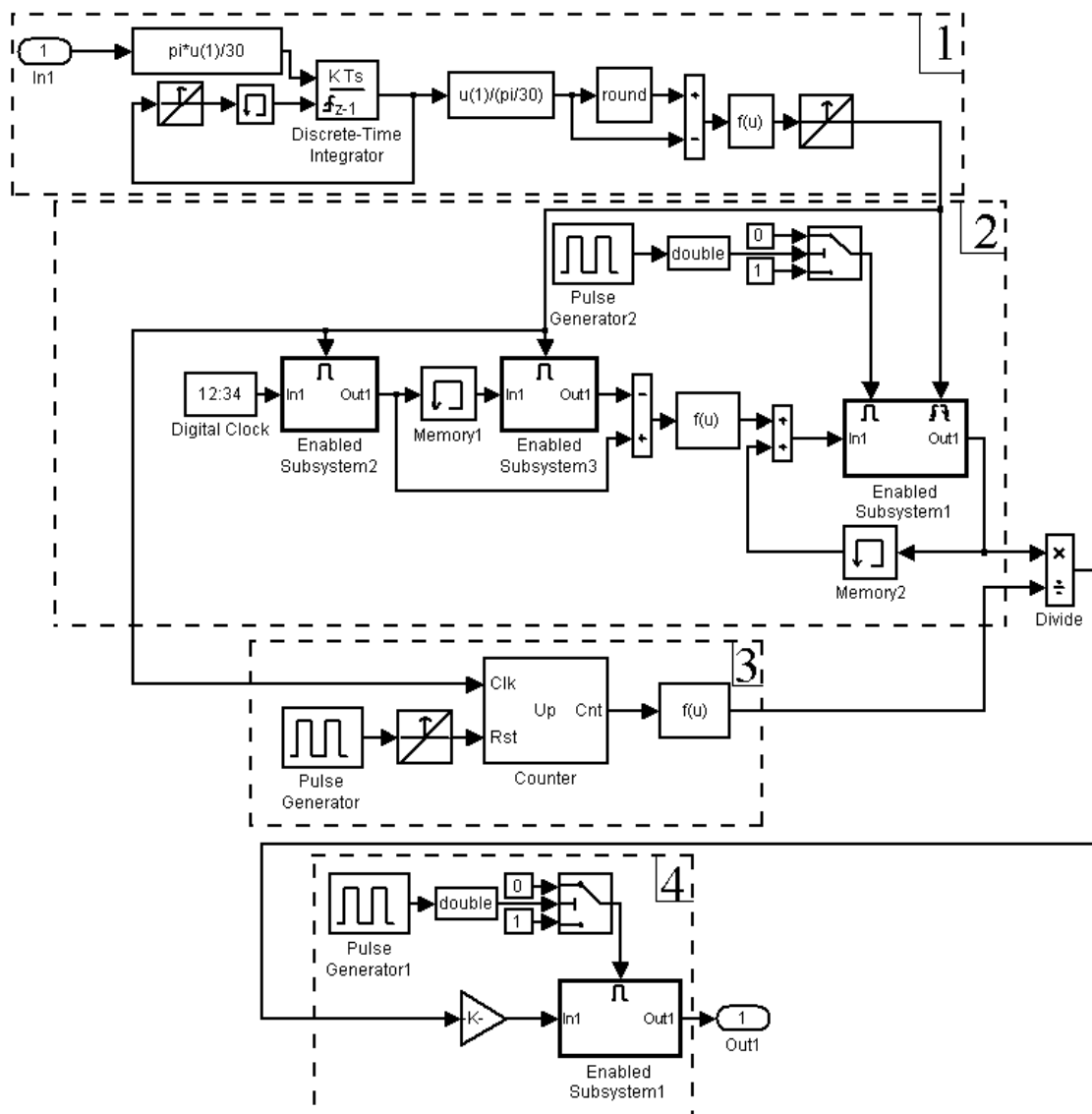


Рисунок 7.8 – Модель для перевірки динамічних характеристик тахогенератора

У блоці 2 проводиться визначення часу між сусідніми імпульсами, обчислення частоти проходження імпульсів $f = 1/t$, її усереднення і обнулення за період 0,01 с. У блоці 3 визначається кількість повних циклів розрахунку частоти вхідних імпульсів. Вихід блоку 2 ділиться на вихід блоку 3 і отриманий результат подається у блок 4, де він фіксується протягом 0,01 с і передається на вихід *Out1* для подальшого перетворення.

Період дискретизації 0,01 с обраний відповідно до тактової частоти використовуваного мікроконтролера.

Для зниження впливу дискретності вихідного сигналу на систему керування електроприводом застосований цифровий фільтр. Модель синтезу цифрового фільтра, діалогове вікно блоку синтезу форми вихідного сигналу, результат розрахунку оптимізації цифрового фільтра, графік вхідного сигналу (ступінчастий сигнал) і після цифрового фільтра, ЛАЧХ і ЛФЧХ синтезованого цифрового фільтра, модель для дослідження синтезованого фільтра, представлені на рис. 7.9–7.14.

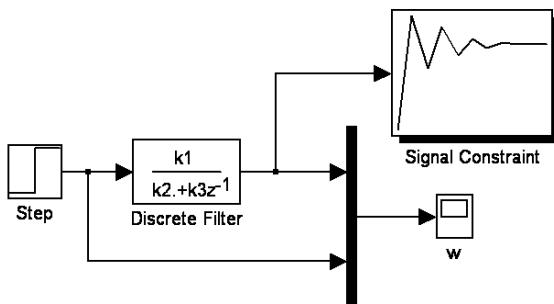


Рисунок 7.9 – Модель синтезу цифрового фільтра

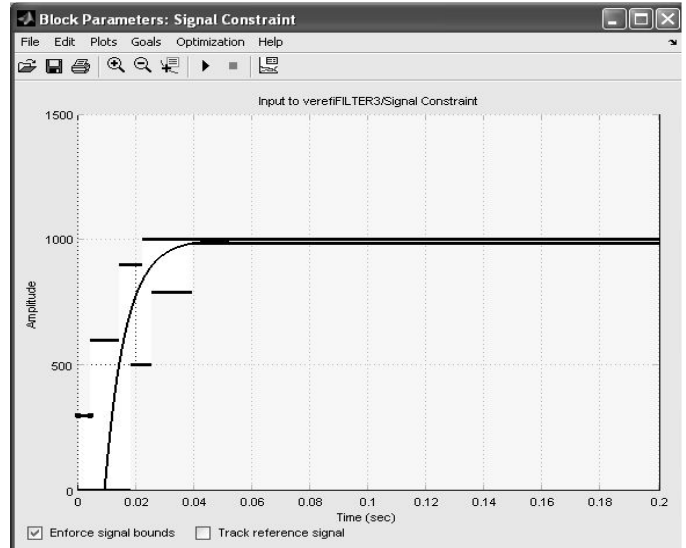


Рисунок 7.10 – Діалогове вікно блоку синтезу форми вихідного сигналу

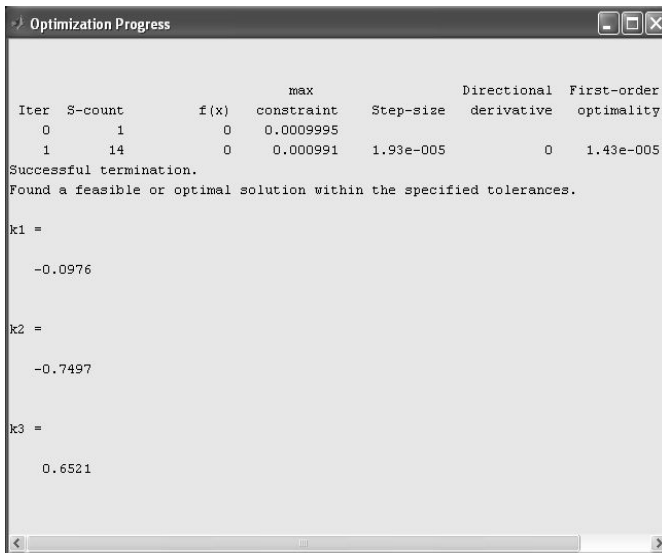


Рисунок 7.11 – Результат розрахунку оптимізації цифрового фільтра

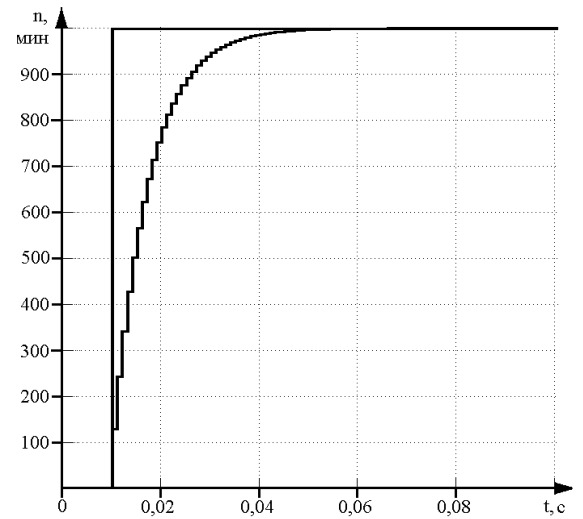


Рисунок 7.12 – Графік вхідного сигналу (ступінчастий сигнал) і сигналу після цифрового фільтра

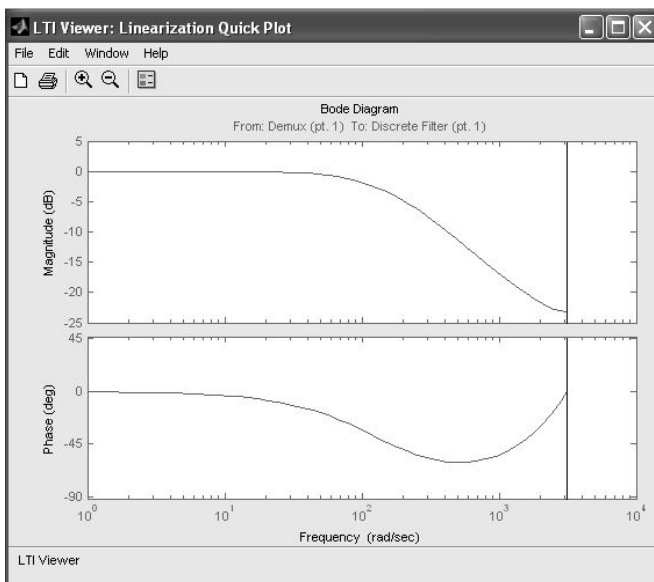


Рисунок 7.13 – ЛАЧХ і ЛФЧХ синтезованого цифрового фільтра

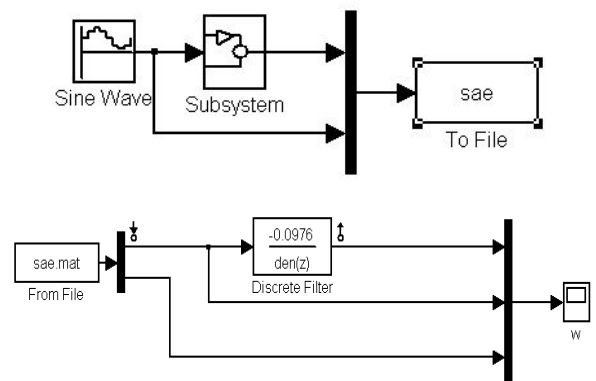


Рисунок 7.14 – Модель для дослідження синтезованого фільтра

На рис. 7.15 представлені результати моделювання вимірювача частоти обертання електродвигуна: крива 1 – вхідний сигнал; крива 2 – сигнал, що імітує вихід з вимірювача частоти обертання електродвигуна; крива 3 – сигнал після цифрового фільтра.

Як видно з результатів моделювання, затримка сигналу становить 0,03 с, а сам сигнал має вигляд, практично ідентичний формі вхідного сигналу.

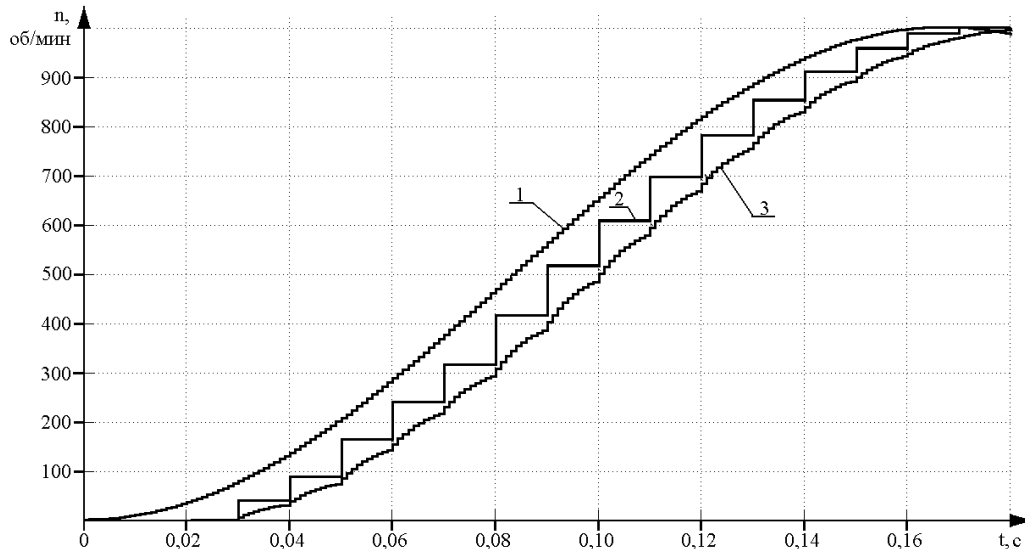


Рисунок 7.15 – Результат моделювання сигналу вимірювача частоти обертання електрорушії

7.1.3. Оцінка похибок вимірювання тарування моменту і моментоміру

Оцінювання якості створених електрорушіїв АПА, що планується випускати на основі впровадження передових технологій, сучасних машин, механізмів і приладів вимагає забезпечення вимірювальними приладами граничної точності. Як відомо, вимірювальна техніка має великий арсенал різних засобів. У даний час актуальною є проблема вибору необхідних засобів вимірювання, для вирішення якої важливо правильно визначити критерії оцінки ефективності їх застосування. У якості таких критеріїв у електрорушійних системах АПА використовують метрологічні характеристики засобів вимірювання.

Для проведення досліджень ефективності систем АСК електрорушійними на основі електроприводів, створено стенд, до складу якого входить спеціально розроблений моментомір *МЕВ-350*. Методика метрологічної атестації моментоміру (МММ) встановлює метод і засоби вимірювань обертового моменту електрорушіїв у діапазоні $0...35 \text{ кг} \cdot \text{см}$ ($0...3,43 \text{ Нм}$) відповідно до вимог нормативної документації [4].

Методика атестації моментоміру виходить з методу звірення моменту, створюваного його противагами 1 (рис. 7.16) і вантажами 2 з моментом M_{oi} ,

що виникає при дії відомого вантажу атестованих гир і платформи m_i на відомому плечі l_0 шківів 3, з'єднаного зі стрілкою 4 і спираючогося на підшипники опори 5. Методика передбачає оцінку похибки вимірювання тарированого моменту і оцінку похибки моментоміру *МЕВ-350*.

Оцінка похибки вимірювання тарированого моменту M_{oi} .

Значення тарированого моменту M_{oi} визначається виразом

$$M_{oi} = F_i \cdot l_i. \quad (7.1)$$

Перший множник F_i є сила, з якою маса гирі впливає на плече шківів l_i .

Величина F_i відповідає силі, яка визначає обрану точку моментоміру

$$F_i = F_{oi} + \Delta F_{oi}. \quad (7.2)$$

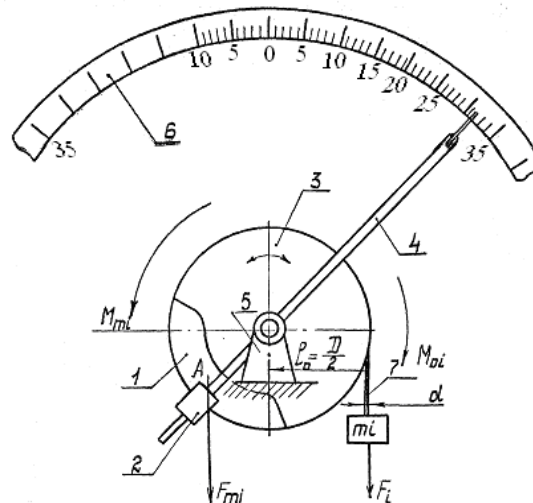


Рисунок 7.16 – Конструкція моментоміру *МЕВ-350*

У формулі (7.2) під F_{oi} слід розуміти номінал гир маси m_i , а під ΔF_{oi} – суму абсолютної похибки оцінки номіналу гир ΔF_{or} , яка становить 0,1 % від F_{oi} (для гир ВЛТ р. 3 і ВЛО-5-4 р. 4), і максимальної величини абсолютної похибки оцінки зусилля гир $\Delta F_{тр}$, що викликається дією сил тертя підшипника обертання опори 5

$$\Delta F_{oi} = \Delta F_{or} + \Delta F_{тр}, \quad (7.3)$$

$$\text{де } \Delta F_{or} = 0,001 F_{oi}, \quad \Delta F_{тр} = \gamma_{\max} F_{oi} / 100\%, \quad (7.4)$$

$$\gamma_{\max} = (\gamma_i)_{\max} = (\Delta F_{сп} / F_{oi} \cdot 100\%)_{\max}, \quad (7.5)$$

$$\Delta F_{\text{срi}} = \frac{1}{6} \sum_1^6 \Delta F_{\text{тpи}}. \quad (7.6)$$

Величина $\Delta F_{\text{тpи}}$ визначається зусиллям, яке викликається масою гир Δm_i , необхідним для зсунення стрілки моментоміру на 0,2 мм. У кожній точці шкали проводиться 6 вимірювань і усереднення значень параметрів $F_{oi}, \Delta F_{\text{срi}}, \gamma_i$. Максимальне значення $\Delta F_{\text{тp}}$ залежить від похибки γ_{max} вибирається за результатами випробування у кожній точці шкали і розрахунку по (7.4–7.6):

$$\Delta F_{oi} = F_o \left(0,001 + \frac{\gamma_{\text{max}}}{100\%} \right) = 0,01 F_{oi} (0,1 + \gamma_{\text{max}}). \quad (7.7)$$

Другий множник формули (7.1) позначає плече l_i , яке визначається сумою радіусів шківів $0,5D_o$ і нитки підвісу вантажу гир $0,5d_o$

$$l_i = 0,5(D - d), \quad (7.8)$$

де

$$D = D_o + \Delta D_o, \quad (7.9)$$

$$d = d_o - \Delta d_o, \quad (7.10)$$

$$D_o = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}; \quad d_o = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}.$$

Величина ΔD_o максимального ексцентриситету шківів щодо вісі обертання визначається індикаторною голівкою годинникового типу ГЧ (ціна поділки 0,01 мм). Діаметр шківів D_o визначається за допомогою важеля скоби СВ, що наструюється набором плиток Іогансона (ціна поділки нуль-органу 0,002 мм, діапазон виміру 75..125 мм). Діаметр нитки d_o і середнє зменшення його при подовженні під дією вантажу гир Δd_o вимірюється мікрометром МК (ціна поділки 0,01 мм, діапазон вимірювань 0..25 мм). Відповідно до (7.1–7.10) відносна похибка тарировки моментоміру становить

$$\gamma_m = \frac{\Delta M}{M} \cdot 100\% = \sqrt{(0,1 + \gamma_{\text{max}})^2 + 10^4 \frac{\Delta D_o^2 + \Delta d_o^2}{(D_o + d_o)^2}}. \quad (7.11)$$

Величина ΔD_o визначається за допомогою індикаторної голівки типу ГЧ, укріпленої на несучій плиті моментоміру і становить в максимумі $+0,23 \cdot 10^{-3}$ м. Максимальне значення Δd_o виміряне МК склало $0,1 \cdot 10^{-3}$ м.

Підставивши значення $\gamma_{\max}, \Delta D_o, \Delta d_o, D_o, d_o$ у (7.11) отримаємо величину похибки тарованого моменту M_{oi} .

Відповідно до МММ (додаток Б) визначено величини γ_{\max} . Досліди проводилися для лівої і правої частин моментоміру. Для зниження впливу коефіцієнтів масштабування ($1 \text{ кг} \approx 9,81 \text{ Н}$) всі дані у таблицях 7.1 і 7.2 наведені в одиницях виміру інструментарію. Усереднені дані зведені в таблицю 7.1. Як видно з даних табл. 7.1 величина γ_{\max} склала 0,6 %.

Відповідно до даних вимірювання $D_o, d_o, \Delta D_o, \Delta d_o$ і розрахунку γ_{\max} похибка оцінки тарованого моменту M_{oi} за виразом (11) дорівнює

$$\gamma_m = \sqrt{\left(\frac{0,1+0,6}{100}\right)^2 + \frac{(0,23 \cdot 10^{-3})^2 + (0,1 \cdot 10^{-3})^2}{(0,1+0,001)^2}} \cdot 100\% = 0,8\%.$$

Таблиця 7.1 – Усереднені дані

Номер серії дослідів	Параметр			
	$M_{oi}, \text{кг} \cdot \text{см}$	$F_{oi}, \text{кг}$	$\Delta F_{\text{cp}} \cdot 10^{-3}, \text{кг}$	$\gamma_i, \%$
1	2,5	0,25	1,5	0,6
2	5,0	0,51	2,5	0,2
3	7,5	0,75	5,0	0,6
4	10,0	1,02	6,0	0,6
5	12,5	1,25	8,0	0,3
6	15,0	1,51	5,0	0,3
7	17,5	1,76	5,0	0,2
8	20,0	2,01	3,0	0,2
9	22,5	2,26	5,0	0,2
10	25,0	2,55	5,0	0,2
11	27,5	2,76	5,0	0,2
12	30,0	3,01	5,0	0,2

Так як, $\gamma_m < 0,33\gamma$, тобто менше 3 %, то можна вважати, що метод атестації метрологічно надійний за точністю.

Оцінка похибки моментоміру *МЕВ-350* здійснена наступним чином. Методика атестації виходить з рівноваги моментів протизаги M_i і тарованого моменту M_{oi} у обраній точці шкали моментоміру

$$M_i = M_{oi}. \quad (7.12)$$

У кожній точці шкали моментоміру проводиться $i = 6$ вимірювань моменту M_i . Усереднення значення M_i абсолютних і відносних похибок вимірювання моменту обертання визначаються за формулами

$$M_{icp} = \frac{1}{6} \sum_1^6 M_i, \quad (7.13)$$

$$\Delta M_{icp} = \frac{1}{6} \sum_1^6 (M_i - M_{oi}), \quad (7.14)$$

$$\gamma_{im} = \frac{\Delta M_{icp}}{M_{icp}} 100\%. \quad (7.15)$$

Середнє арифметичне з 14 усереднених значень за виразом (7.15) визначає оцінку математичного очікування похибки вимірювання моменту приладом *МЕВ-350*.

З метою визначення величин γ_i були проведені відповідні дослідження. Усереднені дані зведені у табл. 7.2. Відповідно до табл. 7.2 проведена обробка даних величин γ_i з урахуванням їх нормального розподілу. Обсяг вибірки дорівнює 84 ($i \cdot n = 6 \cdot 14 = 84$), двостороння довірча ймовірність $P = 0,95$, а математичне сподівання рівня похибки *МЕВ-350* – $\gamma_m = \frac{1}{14} \sum_1^{14} \gamma_i = 0,66\% \approx 1\%$.

Відповідно до [4] оцінка математичного очікування похибки величини γ_m визначається її нижньою і верхньою межами (Δ_n, Δ_v). При двосторонньої ймовірності $P = 0,95$ величина ймовірності знаходження γ_m в межах $\pm \Delta = \Delta_n = \Delta_v$ дорівнює $P' = \frac{1+P}{2} = \frac{1+0,95}{2} = 0,975$.

$$\text{Тоді} \quad \Delta = \Delta_n = \Delta_v = \pm \frac{t_\gamma \cdot S}{\sqrt{n}} \quad [4],$$

де $S = M_k \cdot S'$; $S' = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_1^n (\gamma_i - \gamma)^2}$; $n = 14$; t_γ – квантиль розподілу Стюдента для двосторонньої довірчої ймовірності P' ($t_\gamma = 2,201$); S – незміщена оцінка середнього квадратичного відхилення; $M_k = 1,004$.

Таблиця 7.2 – Усреднені дані

Номер серії дослідів	Параметр			
	$M_{oi}, \text{кг} \cdot \text{см}$	$M_i, \text{кг} \cdot \text{см}$	$\Delta M_i, \text{кг} \cdot \text{см}$	$\gamma_i, \%$
1	2,5	2,5	0	0
2	5,0	5,1	0,1	2,0
3	7,5	7,45	0,05	0,7
4	10,0	10,2	0,2	2,0
5	12,5	12,5	0	0
6	15,0	15,1	0,1	0,7
7	17,5	17,6	0,1	0,6
8	20,0	20,1	0,1	0,5
9	22,5	22,6	0,1	0,4
10	25,0	25,1	0,1	0,4
11	27,5	27,6	0,1	0,4
12	30,0	30,1	0,1	0,3
13	32,5	32,3	0,2	0,6
14	35,0	34,8	0,2	0,6

$$\text{При } S' \approx 0,482; S = 1,004 \cdot 0,482 = 0,484, \Delta = \pm \frac{2,201 \cdot 0,484}{\sqrt{14}} = \pm 0,3\% .$$

Тобто метод атестації метрологічно надійний за точністю ($\gamma_m < 3\%$).

Для перевірки працездатності стенду СВ-1 проведено низку експериментальних дослідів. Програмне забезпечення написане у *Simulink*. На рис. 7.17 приведена частина файлу, яка використовується для отримання даних і керування системою «навантажувальна машина – машина постійного струму електрорушій» за допомогою модулів СПМ через інтерфейс RC-232. У ній використовуються блоки ініціалізації, синхронізації, читання, записи і буферизації інтерфейсу RC-232. Обробка сигналів і вироблення керуючого впливу проводиться у блоці *SUBSYSTEM*. Блок *Display* відображає наступну інформацію: 4 байта синхронізації, 8 байтів інформації з аналогових входів, 2 байта інформації з цифрового входу (вимірювання частоти обертання).

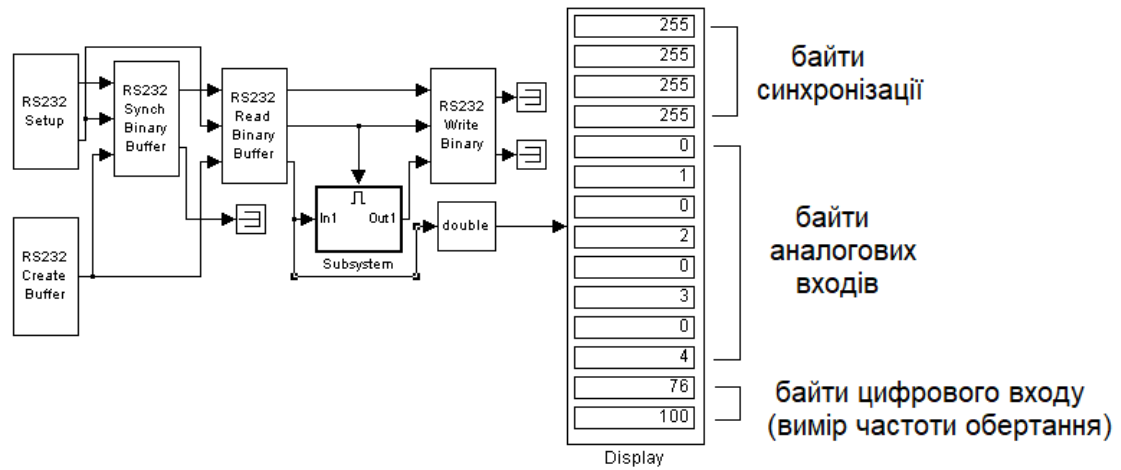


Рисунок 7.17 – Блок керування навантаженням

Як приклад роботи системи використовувалися три режими стабілізації швидкості обертання системи постійного струму (рис. 7.18):

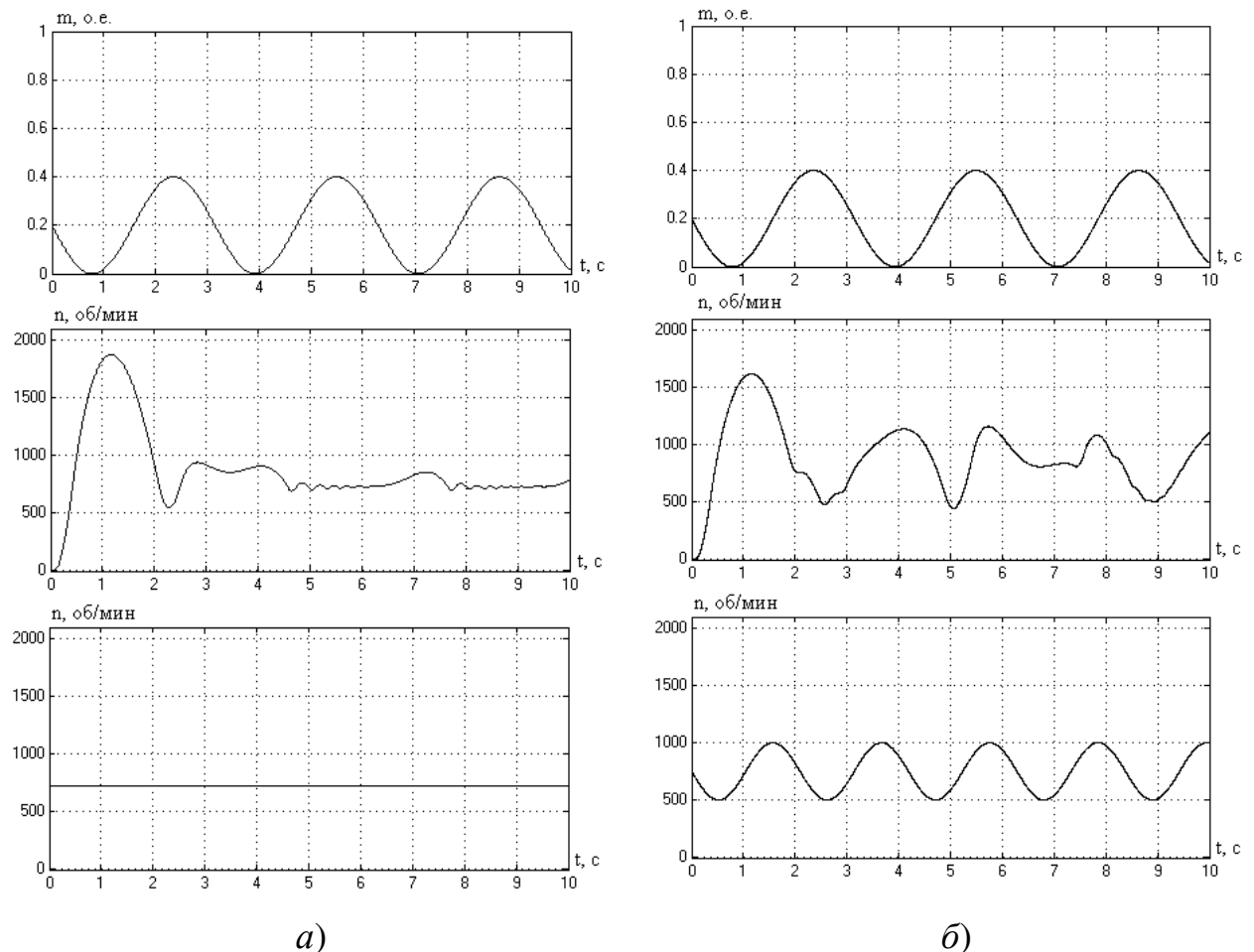
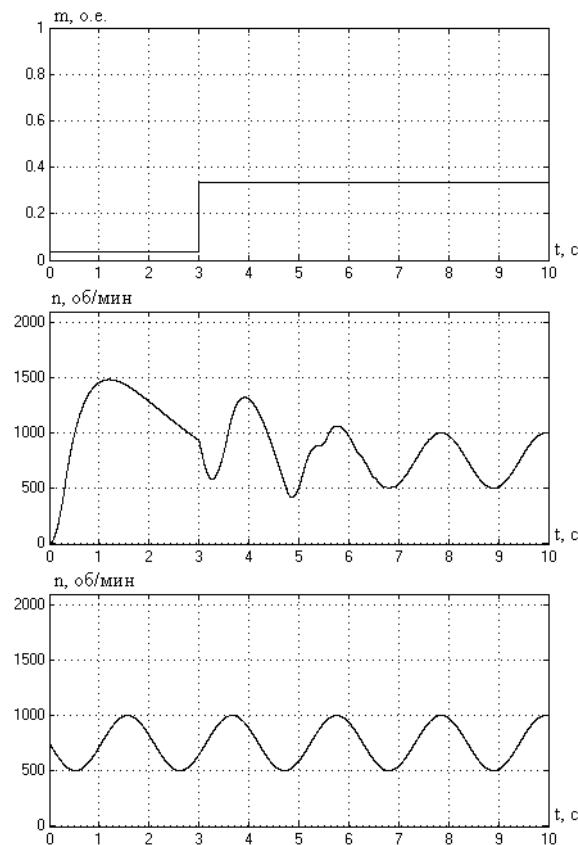


Рисунок 7.18, а, б – Графіки залежностей моменту на валу, швидкості обертання, заданої швидкості обертання при різних режимах:
 а) навантаження змінюється за синусоїдальним законом, задана швидкість обертання постійна; б) навантаження і задана швидкість обертання змінюється за синусоїдальним законом



в)

Рисунок 7.18, в – Графіки залежностей моменту на валу, швидкості обертання, заданої швидкості обертання при різних режимах:
в) навантаження змінюється стрибкоподібно, задана швидкість змінюється за синусоїдальним законом

Керування проводилося за допомогою зворотного зв'язку за швидкістю (використовувалася інтегруюча ланка).

Як видно з аналізу результатів, наведених рис. 7.18, створений універсальний стенд є працездатним у широкому режимі навантажень що дозволяє проводити дослідження електроприводів із застосуванням різних систем керування.

7.2 Приклади синтезу АСК рухом АПА та їх експериментальні дослідження за допомогою СМК

7.2.1. Моделювання просторового руху АПА у системі *Simulink*

Для перевірки адекватності представленої у розділі 4 математичної моделі просторового руху АПА були 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 потужністю 400 Вт з номінальною швидкістю обертання 5500 об/хв з приводом постійного струму. Розроблена *Simulink*-модель представлена на рис. 7.19.

Блок «*Subsystem1*» виконує функцію завдання вхідного сигналу для системи. Оператор самостійно обирає необхідний варіант реалізації сигналів – ступінчасті, синусоїдальні, періодичні, за заданою програмою.

Блок «*Subsystem2*» використовується для диференціювання сигналу зворотного зв'язку.

Основну функцію системи керування виконує блок «*Subsystem3*». У нього стікається вся інформація про стан системи, обробляється блоком нечіткої логіки і виробляється рішення на підставі бази правил (рис. 7.20) [17].

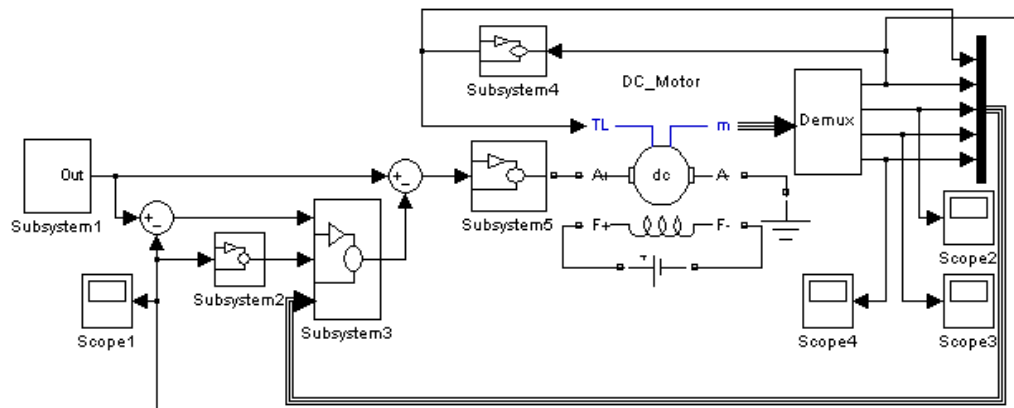


Рисунок 7.19 – Загальний вигляд системи моделювання просторового руху АПА з приводом постійного струму

У блоці «*Subsystem4*» проводиться апроксимація безрозмірних динамічних характеристик гвинта K_T і K_Q , K_p і K_m за заздалегідь заданими у табличному вигляді функціям від відносного ходу J . Далі обчислюється упор і гальмівний момент гвинта і передаються для подальшої обробки у блоках двигуна і нечіткої логіки. Додатково можуть формуватися і враховуватися при моделюванні зовнішні збурюючі впливи. Блок «*Subsystem5*» імітує роботу джерела живлення з вбудованим ШІМ-регулятором. Керуючий сигнал надходить від блоку нечіткої логіки і має жорсткий зв'язок з вихідним. Блок «*DC_Motor*» моделює роботу машини постійного струму. Блок «*Demux*» візуалізує сигнали від блоку «*DC_Motor*» і готує їх для передачі в систему.

Блоки «*Scope1*» – «*Scope4*» необхідні для отримання графіків значущих для дослідження параметрів, наприклад, висоти АПА над ґрунтом, вертикальної швидкості, кількості обертів гребного гвинта електрорушії, сили струму якоря гребної енергетичної установки, керуючої напруги, що задає сигнал і сили зовнішнього збурення. Результати моделювання представлені на рис. 7.21, де показані графіки керуючого сигналу u_z , упору вертикального рушії T , вертикальної швидкості v_z і висоти АПА над ґрунтом h для прямого пуску з класичним ПД-регулятором у системі підтримки заданої швидкості обертання гребного гвинта АПА у вільній воді і керованого пуску з системою керування заснованою на нечіткій логіці.

Для другого випадку керування проводилося за двома параметрами – помилкою і диференціалом помилки швидкості. За даними графіків (рис. 7.21) можна стверджувати, що система керування на базі нечіткої логіки дозволяє знизити коливальність практично до нуля, а перехідний процес скоротити у два рази, що, у свою чергу, веде до скорочення енергетичних і часових витрат на виконання поставленого перед АПА завдання.

За результатами моделювання отримуємо наступні характеристики АПА:

- у швартовному режимі максимальні упори вертикального рушії складають 72 Н при спливанні і 48 Н при зануренні;
- у режимі вертикального руху максимальна швидкість АПА становить 0,5 м/с при спливанні і 0,4 м/с при зануренні.

Перевірка адекватності розробленої системи моделювання просторового руху АПА також проводилася шляхом експериментального визначення упорів рушіїв підводного апарата «Софокл» у швартовному режимі у дослідному басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова та експериментальних досліджень вертикального руху АПА в реальних умовах, коли дією кабель-тросу можна знехтувати.

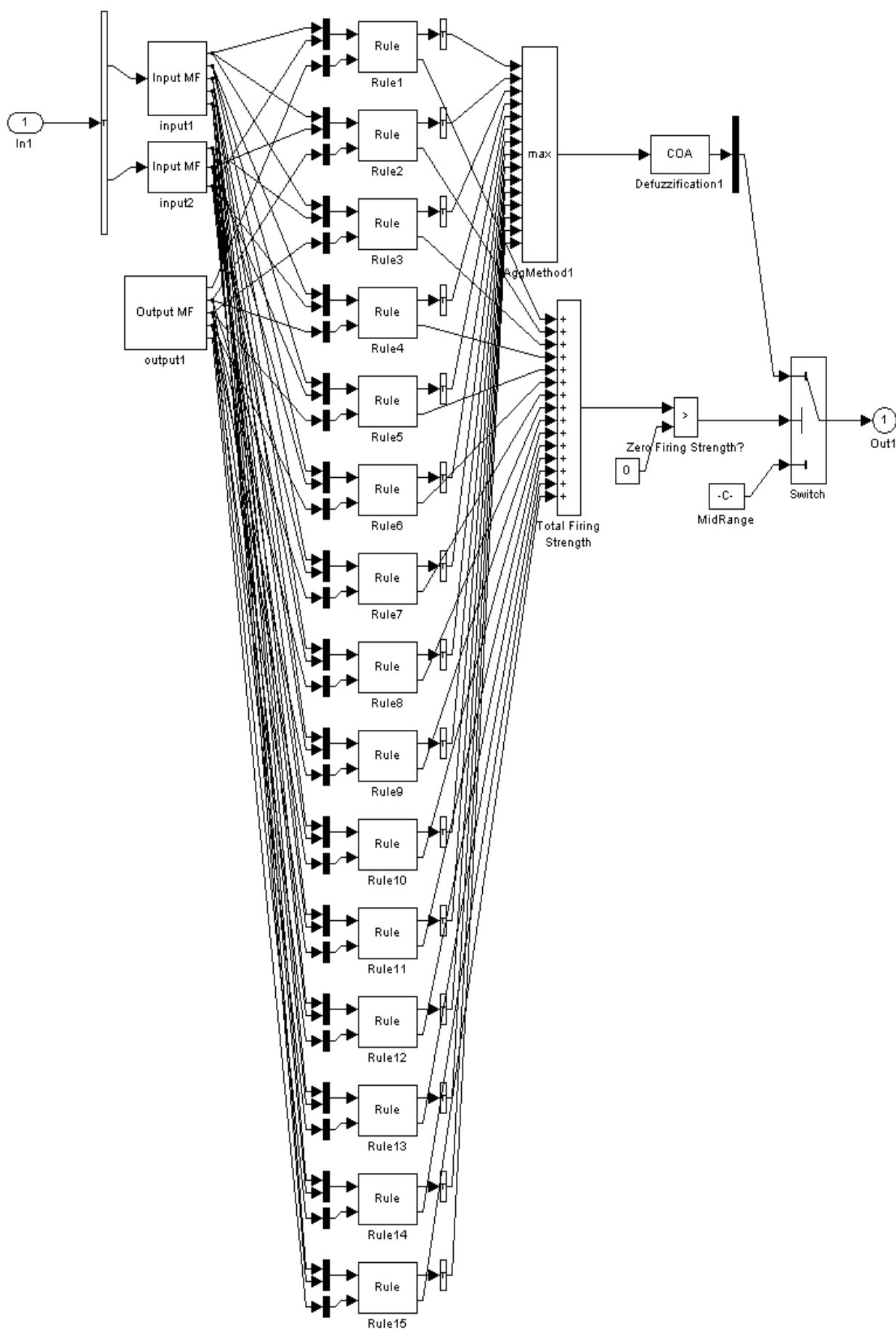


Рисунок 7.20 – Склад блоку «Subsystem3»

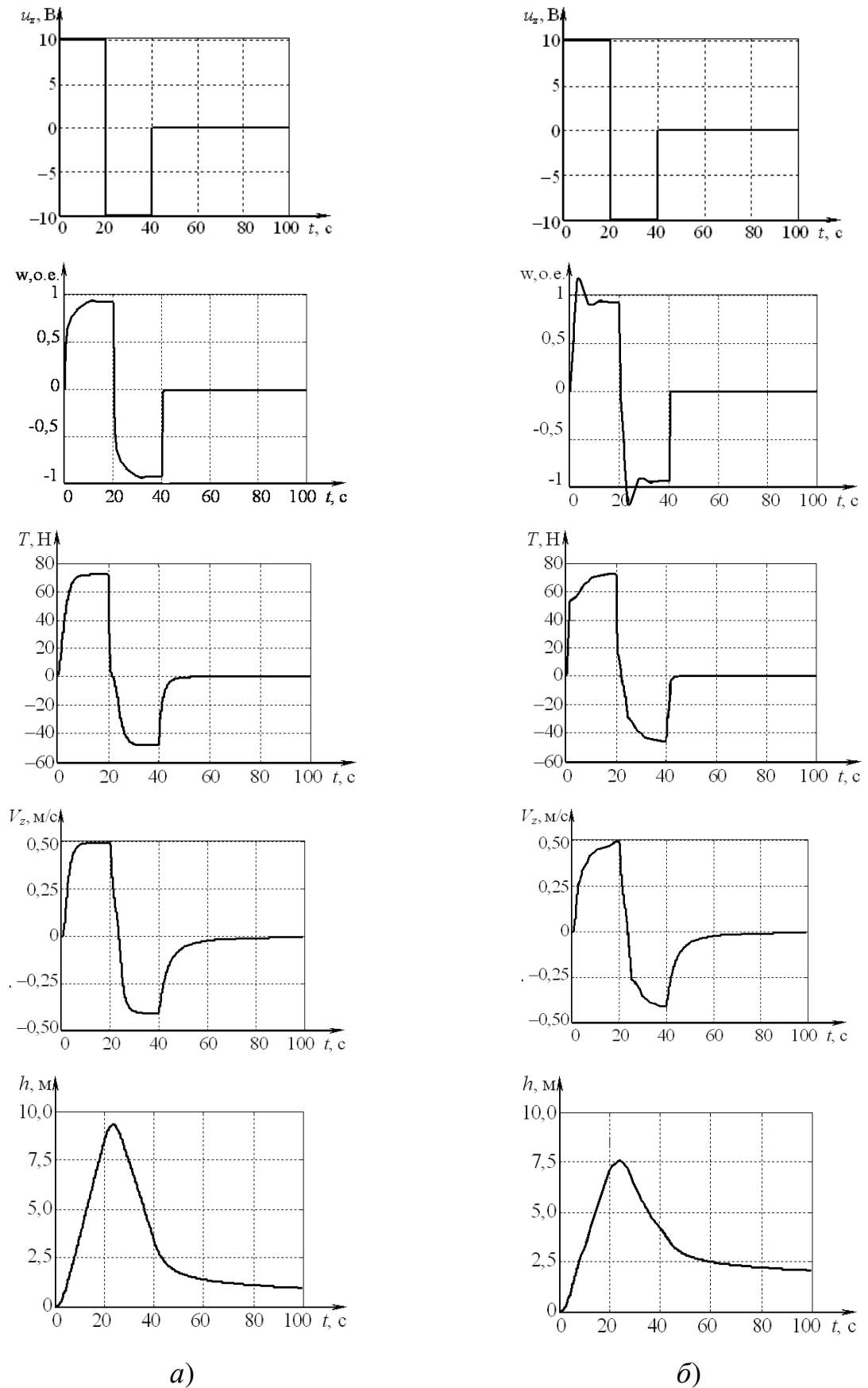


Рисунок 7.21 – Моделювання просторового руху АПА з приводом постійного струму: *a)* під час руху АПА у вільній воді; *б)* керованого пуску з системою керування заснованої на нечіткій логіці

Дослідження показали, що похибка визначення упорів рушіїв в швартових режимах між імітаційної моделлю і роботою АПА в реальних умовах становить не більше 7 %, а похибка у визначенні параметрів вертикального руху – не більше 5 %.

Таким чином, розроблена модель просторового руху АПА адекватна фізичним процесам, що дає можливість використовувати її для дослідження ефективності різних типів регуляторів у системі керування рухом АПА і отримання необхідних характеристик електрорушіїв. Спільне використання цієї моделі і стенду СВ-1, дозволяє використовувати його як спеціалізований моделюючий комплекс для комбінованого дослідження електроприводів, з можливістю паралельного відпрацювання алгоритмів керування на ММ і апробації їх на натурному експерименті.

Відзначимо, що розвиток силової напівпровідникової техніки дозволяє більш широко використовувати АД в якості електрорушія АПА. При цьому можна отримати практично такі ж жорсткі характеристики, як і з приводом постійного струму.

Ще одна з переваг – можливість установки гребного гвинта безпосередньо на вал двигуна (минаючи механічний перетворювач – редуктор), що в свою чергу підвищує ККД системи, керованість, спрощує моделювання, зменшує масогабаритні показники. Для проведення досліджень взяті ті ж вихідні дані, що і у попередньому параграфі, а саме: прив'язна підводна система з АПА масою 45 кг, гребним гвинтом діаметром 20 см, але без редуктора, з насадженим на вал двигуна гребним гвинтом, номінальною потужністю 250 Вт і номінальною частотою обертання 1380 об/хв з приводом змінного струму. Розроблена *Simulink*-модель представлена на рис. 7.22.

Ця ММ модель має кілька відмінностей від розглянутої раніше моделі (рис. 7.19) з приводом постійного струму: блок «*Subsystem5*» імітує роботу джерела змінного струму з вбудованим ШІМ-регулятором. Керуючий сигнал надходить від блоку нечіткої логіки і має жорсткий зв'язок з вихідним; блок «*AC_Motor*» моделює роботу короткозамкненого АД; блок «*Demux*» візуалізує сигнали від блоку «*AC_Motor*» і готує їх для передачі у системі.

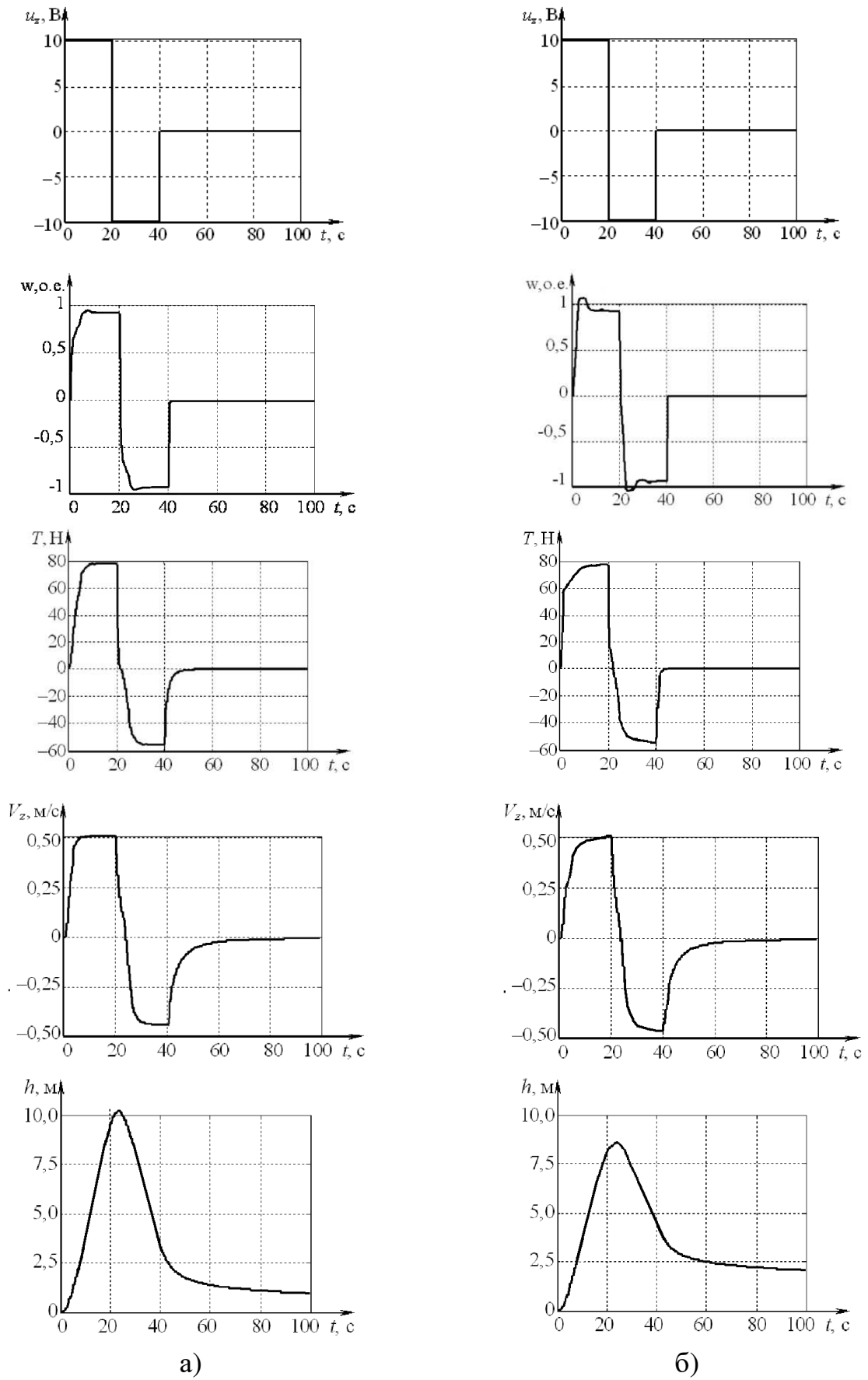


Рисунок 7.23 – Моделювання просторового руху АПА з асинхронним короткозамкненим приводом: а) керуваного пуску з системою керування заснованою на нечіткій логіці; б) при русі АПА у вільній воді

За результатами моделювання отримуємо наступні характеристики АПА:

- у швартовому режимі максимальні упори вертикального рушія складають 78 Н при спливанні і 52 Н при зануренні;
- у режимі вертикального руху максимальна швидкість АПА становить 0,5 м/с при спливанні і 0,4 м/с при зануренні.

Результати моделювання просторового руху АПА з приводами різного роду струму відрізняються незначно (до 8 %), що в основному зумовлено відмінностями номінальних частот обертання гребного гвинта (постійний струм – 1220 об/хв, змінний – 1380 об/хв) та різними механічними характеристиками. На підставі цього і проведених у попередніх розділах досліджень, можна стверджувати, що розроблена *Simulink*-модель дозволяє проводити ефективні дослідження просторового руху АПА з електрорушіями будь-якого роду струму.

7.2.2. Експериментальні дослідження різних типів регуляторів у системі керування частотою обертання електрушієм постійного струму за допомогою СМК

При проведенні експериментальних досліджень різних типів регуляторів в системі керування постійного струму частотою обертання гвинтом АПА, в структуру стенда, для більш точного знімання інформації з досліджуваних об'єктів, введена плата введення-виведення *PCI-1711L* фірми *Advantech* [253]. У таблиці 7.3 наведена її коротка характеристика.

Таблиця 7.3 – Характеристика плати введення-виведення *PCI-1711L*

Характеристика	Опис
Аналоговий вхід	16 роздільних входів, максимальна частота опитування АЦП 100 кГц, максимальна напруга ± 10 В
Цифровий вхід	16 роздільних каналів, низький рівень – 0,4 В max, високий рівень – 2,4 В min
Цифровий вихід	
Форм-фактор	Плата під PCI слот з 68-піновим SCSI-II роз'ємом для підключення зовнішніх пристроїв

Застосування даної плати спільно з пакетом *Real-Time Windows Target* системи *Matlab* [247] дозволило проводити вимірювання необхідних величин, обробляти їх (фільтрація, перетворення) і виробляти керуючий вплив у реальному часі, з одночасною візуалізацією всіх процесів, що відбуваються в моделі на моніторі комп'ютера. Схема керування електрорушієм постійного струму з використанням нечіткого регулятора побудована у пакеті *Simulink* і приведена на рис. 7.24.

На схемі представлені наступні основні елементи:

<i>Digital Input Advantech PCI-1711L</i>	цифровий вхід плати вводу-виводу;
<i>Discrete Filter</i>	цифровий фільтр вхідного сигналу (частоти обертання валу двигуна);
<i>Fuzzy Logic Controller</i>	нечіткий регулятор
<i>Discrete PID Controller</i>	цифровий ПІД регулятор;
<i>Multiport Switch</i>	перемикач регуляторів (1 – нечіткий регулятор, 2 – цифровий ПІД-регулятор);
<i>RS Write Binary</i>	блок передачі сигналу на привід через RS232 порт.

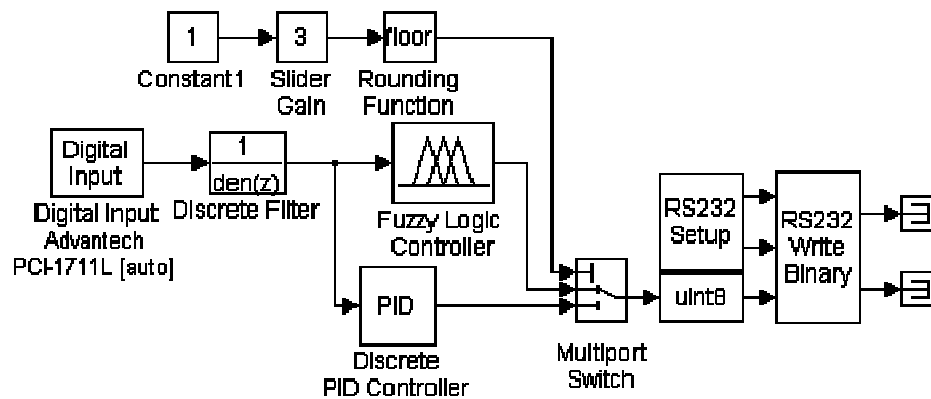


Рисунок 7.24 – Схема керування електрорушієм постійного струму з нечітким регулятором

Для порівняння обрані різні режими регулювання частоти обертання гвинта: регулювання із застосуванням нечіткого регулятора і регулювання із застосуванням цифрового ПІД-регулятора [90, 104].

Коефіцієнти ПІД-регулятора синтезовані у пакеті *Control System Toolbox*, де висувалися вимоги мінімізації помилки і перерегулювання. Нечіткій регулятор синтезований і налаштований в пакетах *Fuzzy Logic Toolbox* і

Optimization Toolbox. Структура регулятора представлена на рис. 7.25. При синтезі використана модель типу Мамдані, де взаємозв'язок між входами і виходом визначається нечіткою базою знань такого формату [130, 219]:

ЯКЩО $(x_1 = a_{1,j1}) \text{ I } (x_2 = a_{2,j1}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_{n,j1})$ з вагою ω_{j1}

АБО $(x_1 = a_{1,j2}) \text{ I } (x_2 = a_{2,j2}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_{n,j2})$ з вагою ω_{j2}

...

АБО $(x_1 = a_{1,kj}) \text{ I } (x_2 = a_{2,kj}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_{n,jk_j})$ з вагою ω_{jk_j}

ТО $y = d_j, j = \overline{1, m}$

де $a_{1,jp}$ – лінгвістичний терм, яким оцінюється змінна x_i у рядку з номером jp ($p = \overline{1, k_j}$); k_i – кількість рядків-кон'юнкцій, в яких вихід y оцінюється лінгвістичним термом d_j ; ω_{jp} – ваговий коефіцієнт правила з порядковим номером; jp – число з діапазону $[0, 1]$, що задає відносну вагу правила при нечіткому логічному виводі; m – кількість термів, використовуваних для лінгвістичної оцінки вихідної змінної.

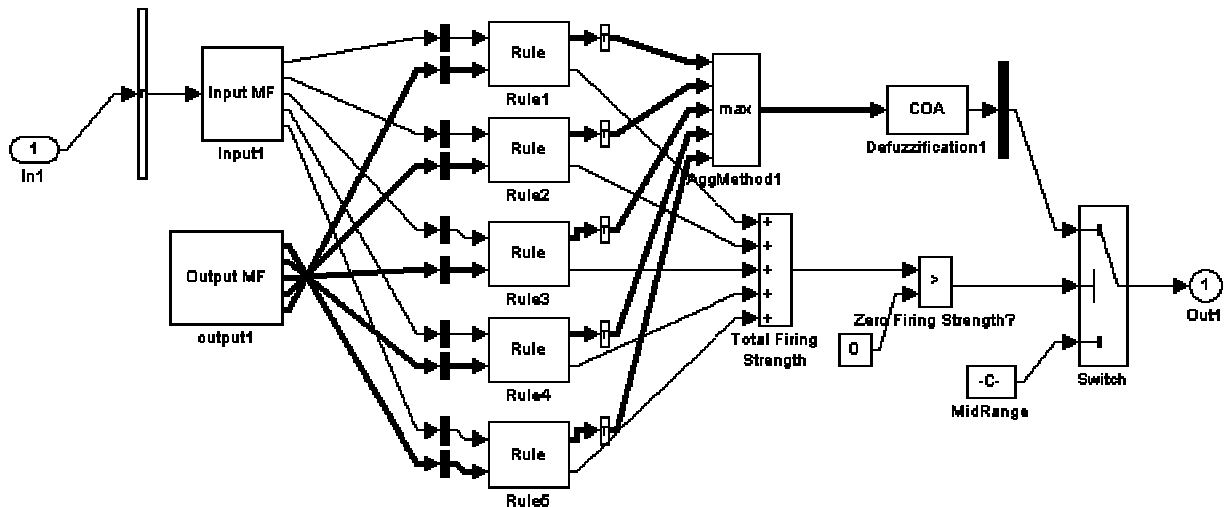


Рисунок 7.25 – Структура нечіткої мережі регулятора швидкості

У даній роботі обмежилися п'ятьма правилами – це продиктовано апробацією даного методу керування.

Для проведення експериментальних досліджень обраний наступний режим роботи приводу: пуск двигуна і його 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. 7.26.

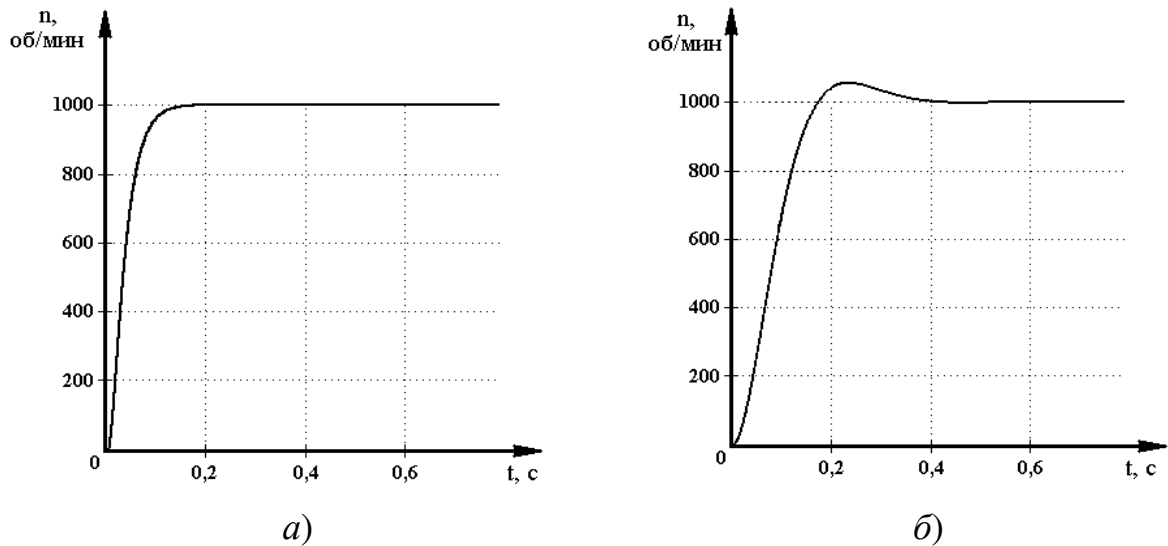


Рисунок 7.26 – Результати експериментальних досліджень систем керування електрорушієм постійного струму: а) з нечітким регулятором; б) з ПІД-регулятором

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 нечіткого регулятора дозволило звести перерегулювання практично до нуля і знизити час перехідного процесу до 0,2 с. Введення плати вводу-виводу дозволяє контролювати перебіг процесів у режимі реального часу, а розроблене ПЗ – практично одночасно проводити дослідження регуляторів, як з нечіткою логікою так і типових П, ПІ, ПІД-регуляторів.

7.2.3. Дослідження системи енергозберігаючого керування вертикальним рухом АПА за допомогою СМК

При розробці нових і модернізації існуючих АПА однією з основних задач є його енергоефективність. 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 таких систем керування рушіями – це можливість їх глибокого і всебічного аналізу вже на стадії попереднього проектування і легкість перенесення синтезованих

ситуативних моделей на реальний об'єкт. Наприклад, у зв'язку із адаптивністю нечітких регуляторів 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 [173, 178, 191, 237].

Для аналізу енергетичної ефективності синтезованого нечіткого регулятора проведено його порівняння з ПІД-регулятором. Коефіцієнти ПІД-регулятора синтезовані і оптимізовані у пакеті *Control System Toolbox*. При цьому висувалися вимоги мінімізації помилки і перерегулювання. Нелінійний регулятор синтезований і налаштований в пакетах *Fuzzy Logic Toolbox* і *Optimization Toolbox*. Аналіз проведений у двох режимах задаючого сигналу: ступінчастому і синусоїдальному. Розроблена модель у пакеті *Simulink* представлена на рис.7.27 і складається з основних блоків: *Step* і *Sine Wave* – блоки завдань керуючих впливів ступінчастої і синусоїдальної форми відповідно; *Fuzzy Logic Controller* – блок нечіткого регулятора; *PID Controller* – блок ПІД-регулятора; *Subsystem1* – блок формування упору; *Subsystem2* – блок формування напруги живлення; *Demux* – блок перетворення вихідних сигналів; *DC_Motor* – блок двигуна постійного струму; віртуальні осцилографи w , T , v , h , P – блоки візуалізації.

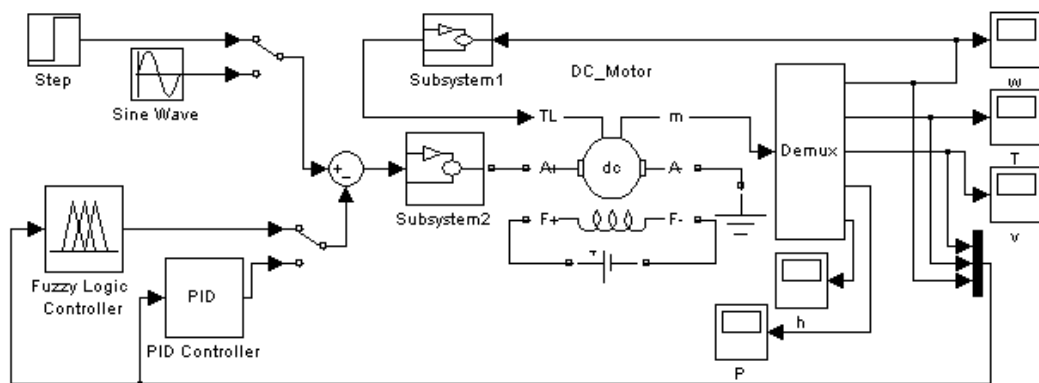


Рисунок 7.27 – Модель для спільного дослідження нечіткого і ПІД - регуляторів

Робота моделі полягає в наступному – сигнал з блоків завдання *Step* і *Sine Wave* подається, за вирахуванням помилки, на блок формування напруги *Subsystem2* двигуна *DC_Motor*. Після відповідного перетворення в блоці

Demux, сигнал піддається подальшій обробці – візуалізації на віртуальних осцилографах w , T , v , h , P , перетворенню в упор в блоці *Subsystem1*; і в якості сигналу зворотного зв'язку для формування помилки в блоках *Fuzzy Logic Controller*, *PID Controller*. Результати досліджень представлені на рис. 7.28 і рис. 7.29. Проведені дослідження показали, що застосування нечіткого регулятора в системі керування вертикальним рухом АПА дозволяє в порівнянні з ПІД-регулятором:

- при ступінчастому заданому сигналі: скоротити в півтора рази час перехідного процесу; звести до мінімуму переколювання; зменшити на 19 % спожиту за перехідний період енергію;

- при синусоїдальній сигналі: скоротити в два рази відставання від задаючого сигналу; зменшити на 13 % спожиту за перехідний період енергію.

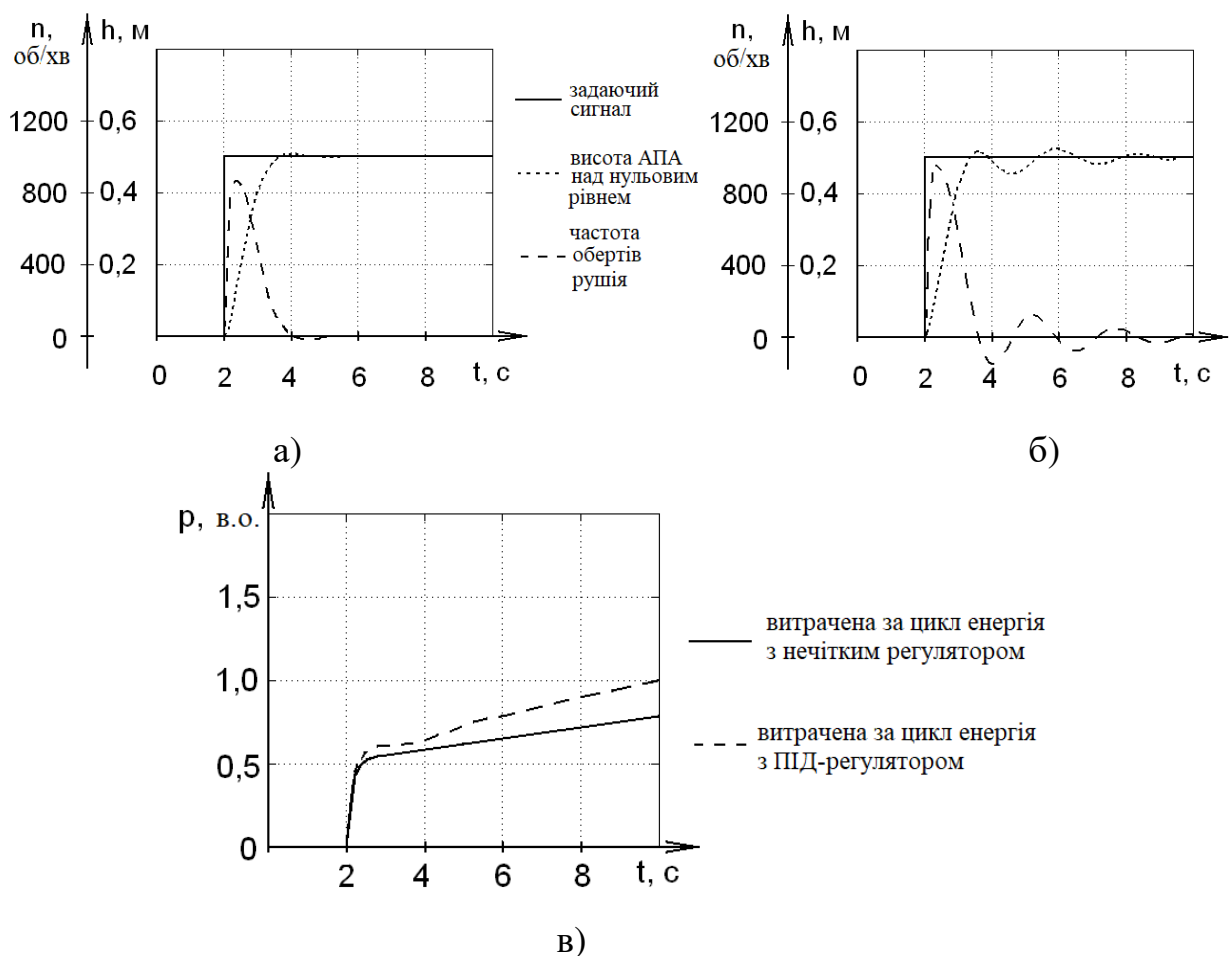


Рисунок 7.28 – Реакція АПА на задаючий ступінчастий сигнал вертикального руху: а) система з нечітким регулятором; б) система з ПІД-регулятором; в) порівняння спожитої енергії при різних регуляторах

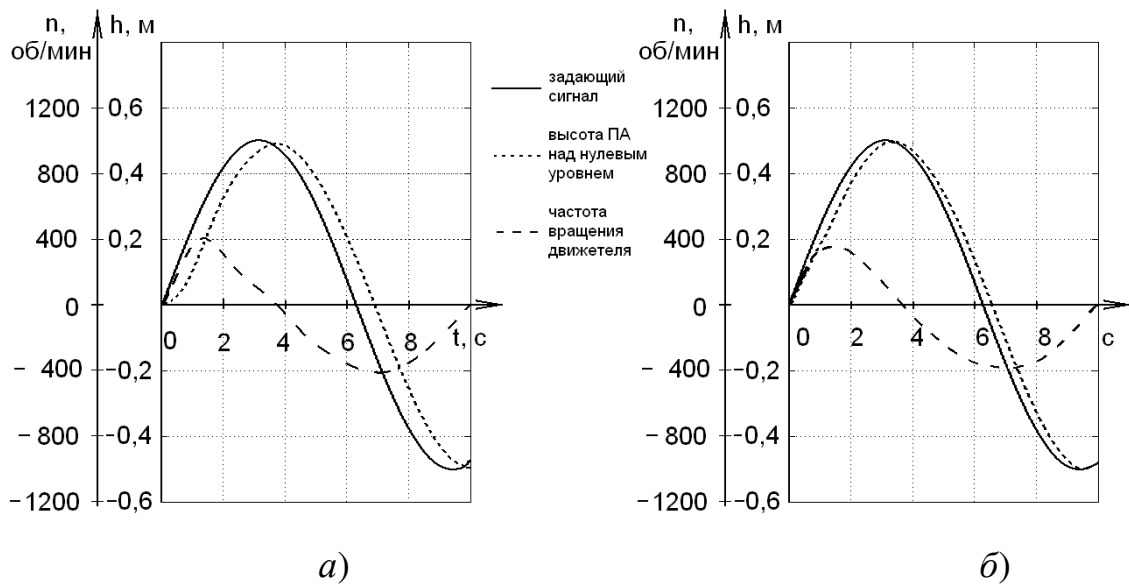


Рисунок 7.29, а, б – Реакція АПА на задаючий синусоїдальний сигнал вертикального руху: а) система з ПІД-регулятором; б) система з нечітким регулятором

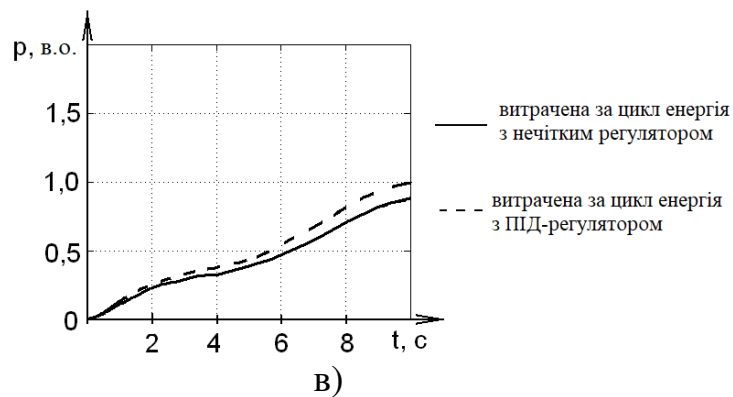


Рисунок 7.29, в – Реакція АПА на задаючий синусоїдальний сигнал вертикального руху: в) порівняння спожитої енергії при різних регуляторах

7.2.4. Розробка та дослідження АСК електрорушійними при горизонтальному прямолінійному русі АПА з різними типами регуляторів

Simulink-моделі синтезованих АСК електрорушійними при горизонтальному прямолінійному русі АПА з адаптивними ПІД-регуляторами і нечіткими регуляторами представлені на рис. 7.30. При синтезі систем використовувалися:

- 1) система рівнянь уточненої математичної моделі [22, 24];
- 2) синтезовані закони керування по стабілізації кутової швидкості обертання гребного гвинта АПА, по стабілізації упору гребного гвинта АПА, по

стабілізації швидкості переміщення АПА при його горизонтальному прямолінійному русі [9, 33];

3) синтезовані адаптивні ПІД-регулятори і нечіткі регулятори: «PID1», «FUZZY1» – адаптивний ПІД-регулятор і нечіткий регулятор для стабілізації координати горизонтального прямолінійного переміщення АПА; «PID2», «FUZZY2» – адаптивний ПІД-регулятор і нечіткий регулятор для стабілізації швидкості переміщення АПА при його горизонтальному прямолінійному русі; «PID3», «FUZZY3» – адаптивний ПІД-регулятор і нечіткий регулятор для стабілізації упору гребного гвинта АПА; «PID4», «FUZZY4» – адаптивний ПІД-регулятор і нечіткий регулятор по стабілізації кутової швидкості обертання гребного гвинта АПА [8, 34, 78, 82].

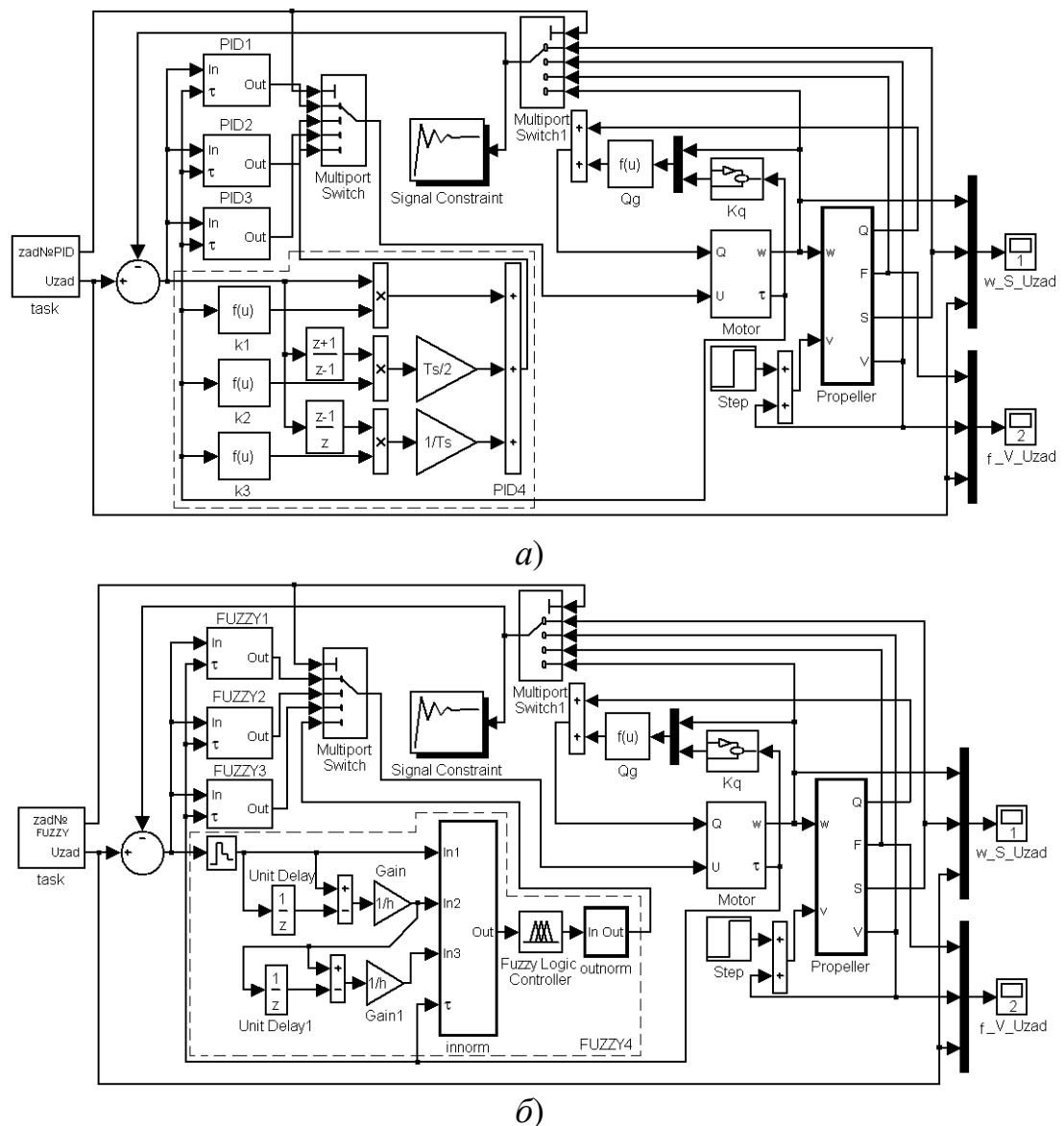


Рисунок 7.30 – Simulink-моделі синтезованих АСК електрорушійями АПА:
а) з адаптивними ПІД-регуляторами; б) з нечіткими регуляторами

У блоці «*task*» *Simulink*-моделі формується завдання і проводиться вибір сигналу зворотного зв'язку і адаптивного ПД-регулятора (або нечіткого регулятора), відповідного завданню.

Вихід блоку «*task*» u_{zad} подається на суматор для визначення помилки $\varepsilon(t)$, яка надходить на вхід «in» блоків регуляторів «*PID1*» – «*PID4*» («*FUZZY1*» – «*FUZZY4*»).

Вихід блоку «*Multiport Switch*» містить керуючий вплив $u(t)$ і подається до блоку «*Motor*». Блок «*Motor*», який поєднує у собі регульоване джерело напруги і асинхронний двигун баророзвантаженого виконання. На виході блоку «*Motor*» отримуємо сигнал « τ » – температуру робочої рідини, який подається у блок K_q і у блоки апроксимації коефіцієнтів k_1, k_2, k_3 блоків «*PID1*» – «*PID4*» («*FUZZY1*» – «*FUZZY4*»). Блок K_q являє собою апроксиматор табличних значень коефіцієнта гідродинамічних втрат K_q у залежності від температури і виду робочої рідини [10, 36]. Також на виході блоку «*Motor*» отримуємо сигнал « w » – кутову швидкість обертання валу електродвигуна. У блоці «*Propeller*» проводиться розрахунок моменту « Q » і упору « F » гребного гвинта, швидкості « V » і координати « S » горизонтального переміщення АПА. Блок «*Signal Constraint*» використовується при налаштуванні адаптивних ПД-регуляторів.

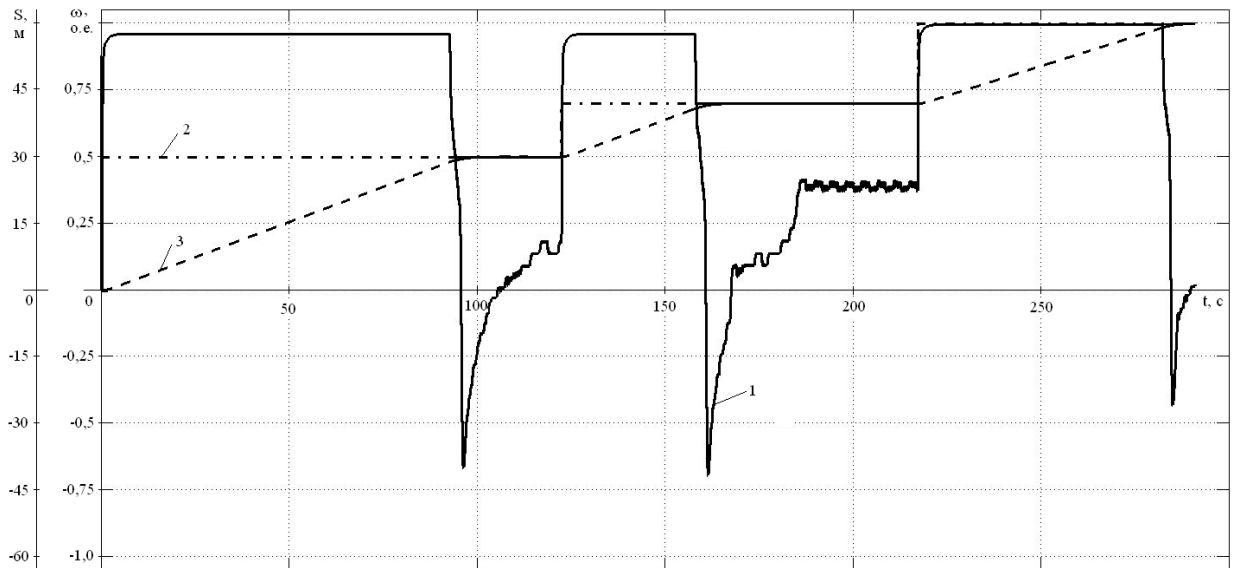
При проведенні досліджень не враховувалися динамічні і часові процеси, що відбуваються з АПА при його поворотах навколо вертикальної осі.

Результати моделювання роботи синтезованих систем управління при горизонтальному прямолінійному русі АПА з адаптивними ПД-регуляторами представлені на рис. 7.31 (а, б), з нечіткими регуляторами – на рис. 7.31 (в, г).

З графіків, представлених на рис. 7.31 видно, що АСК електрорушієм при горизонтальному прямолінійному русі АПА з ПД-регуляторами і нечіткими регуляторами виконали програму переміщення АПА за заданим алгоритмом.

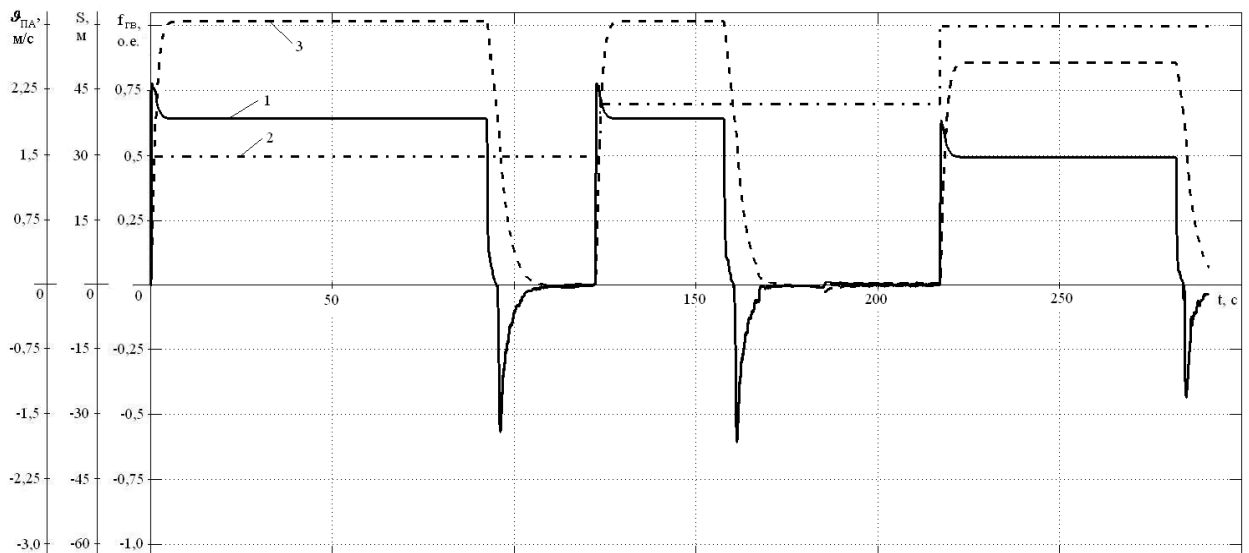
При цьому у перехідних режимах (розгін, гальмування АПА) автоматизована система керування з нечіткими регуляторами показала більшу високу швидкість відпрацювання сигналу.

Додатково проведені дослідження АСК на її робастність – нечутливість до змінювання параметрів баророзвантаженого АД. Ці дослідження також підтверджують високу якість процесів керування АПА при його горизонтальному русі.



a)

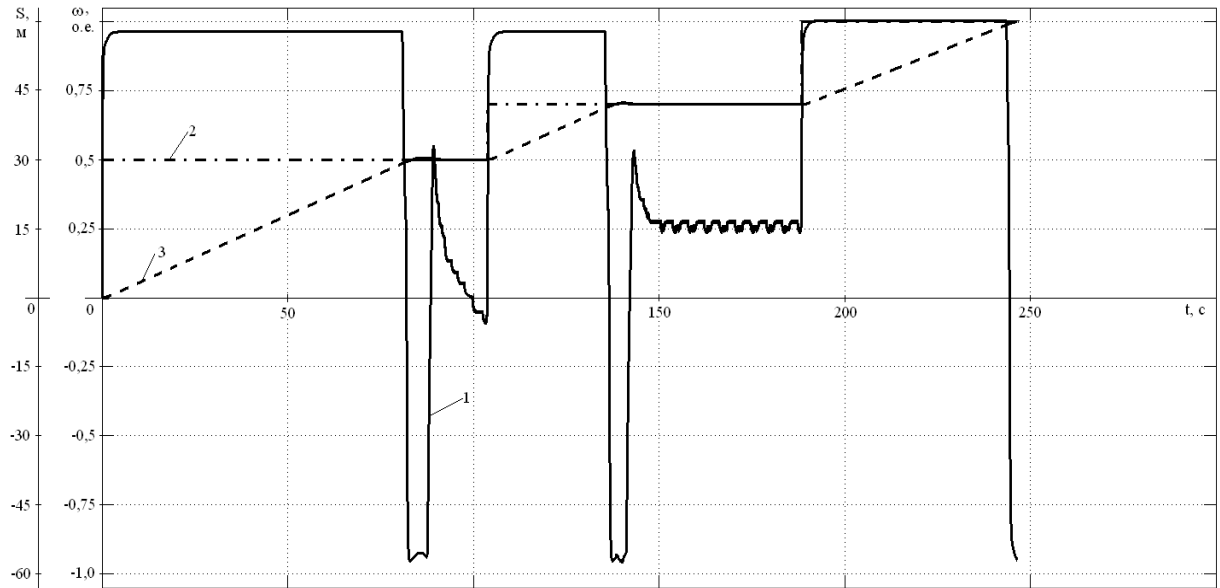
a) – крива 1 – кутова швидкість обертання ГГ; крива 2 – u_{zad} ; крива 3 – координата горизонтального прямолінійного переміщення АПА



б)

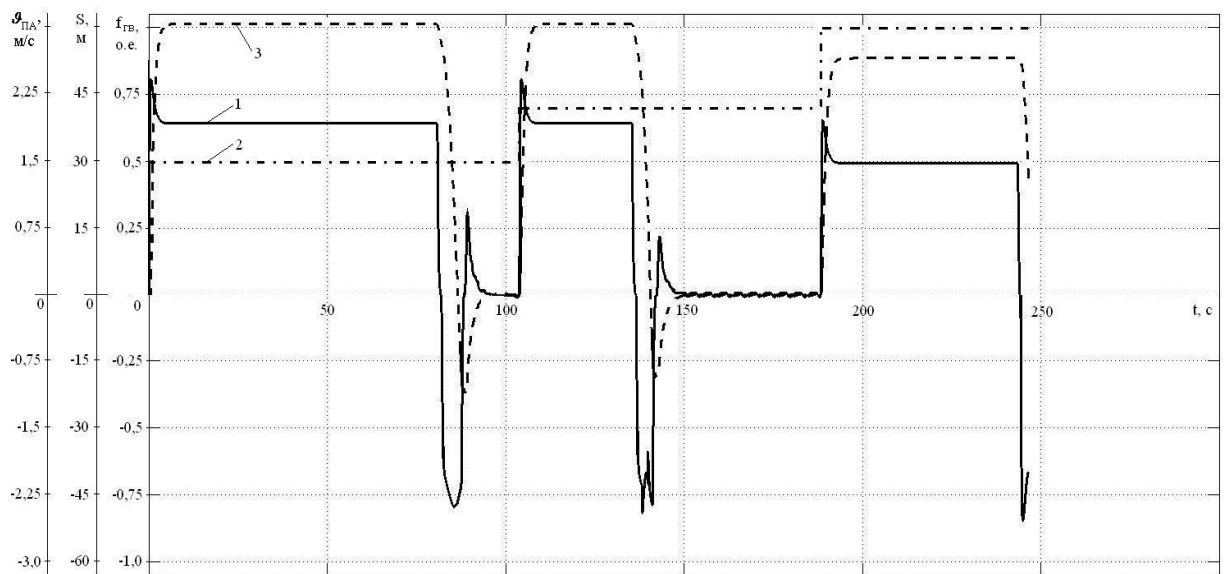
б) – крива 1 – упор ГГ; крива 2 – u_{zad} ; крива 3 – швидкість горизонтального прямолінійного переміщення АПА

Рисунок 7.31, а, б – Результати моделювання роботи синтезованої АСК ЕР при горизонтальному прямолінійному русі АПА з адаптивними ПІД-регуляторами (а, б)



б)

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



з)

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

Рисунок 7.31, б, з – Результати моделювання роботи синтезованої АСК ЕР при
горизонтальному прямолінійному русі АПА з нечітким регулятором (б, з)

7.3 Висновки до розділу 7

1. Запропоновано конструкцію, спроектовано і створено спеціалізований моделюючий комплекс для дослідження ефективності АСК електрорушійними АПА, призначений для відпрацювання у лабораторних умовах алгоритмів і принципів керування, виміру енергетичних і динамічних характеристик електроприводів. Експериментально доведена його працездатність.

2. Запропонована методика метрологічної атестацію навчально-дослідницького лабораторного засобу «Стенд випробувальний СВ-1», що входить до складу спеціалізованого моделюючого комплексу.

3. Розроблено, створено та апробовано вимірювач частоти обертання електродвигуна – тахогенератор. Проведена його метрологічна атестація у складі навчально-дослідного лабораторного засобу СВ-1 і підтверджена можливість застосування із заданою точністю в АСК електрорушійними АПА.

Метрологічна атестація моментоміру з похибкою $\gamma_m = \pm 1 \%$ показала, що похибка вимірювання моменту обертання електричних двигунів моментоміру МЕВ-350 становить $\gamma = \gamma_m \pm \Delta$, тобто $\gamma = 1,0 \pm 0,3 \%$ при двосторонній довірчій ймовірності $P = 0,95$. Розроблений моментомір МЕВ-350 можна використовувати для вимірювання моменту на валу в діапазоні 0...3,43 Нм при проведенні експериментальних досліджень електрорушійів.

4. Синтезовані ПД-регулятор і нечіткий регулятор частоти обертання електродвигуна (для АСК вертикального маршового рушія АПА), проведені їх експериментальні дослідження. Отримані результати показують переваги нечіткої системи у порівнянні із класичними, на основі ПД-регуляторів (знижено перерегулювання системи до нуля, у два рази скорочено час перехідного процесу).

5. Доведена універсальність розробленого програмного забезпечення, що дозволяє на одній лабораторній базі синтезувати регулятори частоти обертання електромеханічними перетворювачами енергії, а також проводити їх експериментальні дослідження.

6. Проведено дослідження розробленого СМК з платою введення-виведення, що дозволяє контролювати перебіг процесів у режимі реального часу і практично одночасно робити дослідження регуляторів, як з нечіткою логікою, так і стандартних П-, ПІ-, ПІД - регуляторів.

7. Поведений аналіз енергетичної ефективності синтезованої нечіткої системи, показав зменшення часу перехідного процесу до 1,5 разу при різних керуючих сигналах, зниження до 19 % спожитої енергії за цикл роботи приводу вертикального рушія.

8. Проведені дослідження функціонування розроблених і синтезованих АСК електрорушіями при горизонтальному прямолінійному русі АПА з адаптивними ПІД-регуляторами і нечіткими регуляторами доводять, що АСК з адаптивними ПІД-регуляторами при гальмуванні АПА має значення перерегулювання кутової швидкості обертання ГГ на 12 % менше, ніж АСК з нечіткими регуляторами. Система керування при горизонтальному прямолінійному русі АПА з нечіткими регуляторами виводить АПА на кінцеву координату завдання на 15 % швидше, ніж система керування з адаптивними ПІД-регуляторами. Точність виведення на задану координату АПА при роботі АСК з нечіткими регуляторами на 29 % вище, ніж при роботі АСК з адаптивними ПІД-регуляторами, це значно підвищує ефективність пропонованого керування автономним плавальним апаратом.

Основні наукові результати розділу опубліковано в [4, 8–10, 17, 18, 22, 24, 30, 33, 34, 36].

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 ПІД «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, близьке 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, непокращувані 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. Андрищенко, О. А. Формирование выходного напряжения ТПН, инвариантного фазе тока нагрузки / О. А. Андрищенко, 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. Волянський, С. М. Особливості побудови автоматичних систем керування рухом об'єктів морської робототехніки / С. М. Волянський, 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. Волянський // 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 / Волянська Я. Б., Голіков В. В., Мазур О. М., Онищенко О. А., Шевченко В. А. // 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 / Волянська Я. Б., Мазур О. М., Обнявко Т. С., Онищенко О. А. // 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., Волянський 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.

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.

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.

21. Volyanskaya, Ya. Determining energy-efficient operation modes of the propulsion electric motor of an autonomous swimming apparatus /

Volyanskaya Ya. , Volyanskiy S., Volkov V., Onishchenko O. // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – № 6/8 (90). – P. 11–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.118984.

22. Волянська, Я. Б. Уточнення параметрів математическої моделі трифазного асинхронного електродвигача системи електродвиження автономного плавачельного апарату / Я. Б. Волянська, С. М. Волянський, О. А. Онищенко / Морські інтелектуальні технології. – 2017. – № 4 (38). – Т. 3 – С. 133–138.

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

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.

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.

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

27. Пат. 56964, Україна, МПК G 01L 3/04, G01L 3/10. Пристрій для вимірювання обертового моменту [Текст] / Волянська Я.Б., Волянський С. М. (Україна); Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № а200900408; заявл. 20.01.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 3. – 4 с.: ил.

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.

29. Волянська, Я. Б. Спрощена модель безконтактного вентиляного 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 экспериментальных исследований эффективности нейронечетких регуляторов электроприводов постоянного тока / 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 Всеукр. 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 ПА / 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 ПА 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 червня – 02 липня 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 плавательного апарата / Я. Б. Волянська, О. А. Онищенко // Актуальні проблеми суднової електроенергетики, електромеханіки та радіоелектроніки: матеріали наук.-метод. конф., ОНМУ, 11–12 грудня 2017 р. – Одеса, 2017. – С. 68–69.

37. Волянська, Я. Б. Методика естимації параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна для рішення задач моделювання систем управління об'єктів морський 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 / Волянська, Я. Б., Довіденко Ю. М., Мазур О. М., Онищенко О. А. // 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 плавательного апарата подвійного призначення / Я. Б. Волянська, С. М. Волянський, О. А. Онищенко // MPP&O–2020: матеріали II Міжнар. науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, Одеса, квітень 2020 р. – Одеса, 2020. – С. 119–123.

40. Волянський, С. М. Тренди розвитку багатоцільових автономних плавательних апаратів подвійного призначення / С. М. Волянський,

Я. Б. Волянська, О. А. Онищенко // Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах: матеріали ХХ наук.-техн. конф., ДНДІ ВС ОВТ, 03–04 вересня 2020 р. – Чернігів, 2020. – С. 52–54.

41. Волянська, Я. Б. Основи наукових досліджень: навчальний посібник / Я. Б. Волянська, С. М. Волянський. – Миколаїв: Іліон, 2017. – 216 с. (Гриф Вченої Ради Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, протокол №10 від 27.10.2017 р.). ISBN 978-617-534-442-2.

42. Волянська, Я. Б. Моделювання електромеханічних систем: навчальний посібник / Я. Б. Волянська, С. М. Волянський. Під ред. Онищенко О. А. – Миколаїв: Іліон, 2018. – 246 с. (Гриф Вченої Ради Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, протокол №10 від 27.10.2017 р.). ISBN 978-617-534-483-5.

43. Agudelo, J. G. Contribution to the model and navigation control of an autonomous underwater vehicle / G. J. Agudelo. – SARTI Research Group, 2015. – 211 p.

44. Alam K. Design and construction of an autonomous underwater vehicle / K. Alam, T. Ray, S. G. Anavatti // Neurocomputing. – 2014. – Vol. 142. – P. 16–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.12.055>.

45. Anibal, T. Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU review article / Anibal, T. de Almeida, Joao Fong, Hugh Falkner, Paolo Bertoldi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 74. – P. 1275–1286.

46. Ansari, A. A. Mathematical model of asynchronous machine in MATLAB Simulink / A. A. Ansari, D. M. Deshpande // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2010. – № 2 (5). – P. 1260–1267.

47. Archa, V. S. A comparison on the performance of BLDC motor drive with DBR, Luo and BL-Luo / V. S. Archa, Sojy C. Rajan // Imperial Journal of Interdisciplinary Research. – 2016. – Vol. 2. – № 9. – P. 1038–1042.

48. Arun Noyal Doss, M. Reduction in cogging torque and flux per pole in BLDC motor by adapting U-clamped magnetic poles / Arun Noyal Doss M.,

Vijayakumar S., Jamal Mohideen A., Sathiah Kannan K., Balaji Sairam N. D., Karthik K. // International Journal of Power Electronics and Drive System. – 2017. – Vol. 8. – № 1. – P. 297–304. DOI: 10.11591/ijped.v8i1.pp297-304.

49. Agisjaih, Ayulia Sitio An analysis Nomoto gain and Norbin parameter on ship turning maneuver / Ayulia Sitio Agisjaih // IPTEK, The Journal for Technology and Science. – 2010. – Vol. 21. – № 2. – P. 307–309.

50. Bhadani, A. Modeling and controlling of BLDC motor / Bhadani A., Koladiya D., Devani J., Tahiliani A. // International Journal of Advance Engineering and Research Development. – 2016 – Vol. 3 – № 3. – P. 139–144.

51. Blintsov V. Control automation of maritime unmanned complex with a group of autonomous vehicles / V. Blintsov, Leo Tosin Aloba // EUREKA: Physics and Engineering. – 2019. – № 4. – P. 54–62. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00940.

52. Borlaug, I.-L.G. Trajectory tracking for an articulated intervention AUV using a super-twisting algorithm in 6 DOF: This research was funded by the Research Council of Norway through the Centres of Excellence funding scheme, project No. 223254 NTNU AMOS / I.-L. G. Borlaug, K. Y. Pettersen, J. T. Gravdahl // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51. – I. 29. – P. 311–316. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.506.

53. Boyko A. Synthesis and research of automatic balancing system of voltage converter fed induction motor currents / Boyko A., Budashko V., Yushkov E., Boyko N. // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2016. Vol. 1. – № 2 (79). – P. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.60544>.

54. Braslavskij, I. Thyristor controlled asynchronous electrical drive without speed sensor / I. Braslavskij, A. Zyuzev, K. Nesterov // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. – 2008. – P. 1093–1096. DOI: 10.1109/speedham.2008.4581098.

55. Budashko, V. V. Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex / V. V. Budashko // Electrical engineering & Electromechanics. – 2017. – № 2. – P. 62–72.

56. Budashko, V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes / Budashko V., Nikolskyi V., Onishchenko O., Khniunin S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2016. – Vol. 3. – № 8 (81). – P. 10–21.
57. Caridis, Piero Inspection, repair and maintenance of ship structures (2nd Edition) / Piero Caridis. – eBook, Product Code: 4394, 2009 – 326 p.
58. Casado, M. H. Identification of Nonlinear Ship Model Parameters Based on the Turning Circle Test / M. H. Casado, R. Ferreiro, F. J. Velasco // *J. Ship Res.* – 2007. – 51 (2). – P. 174–181.
59. Chan, C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles / C. C. Chan // *Proceedings of the IEEE.* – 2002. – Vol. 90. – № 2. – P. 247–275.
60. Chen, Chen-Wei Modeling and Simulation of an AUV Simulator With Guidance System / Chen-Wei Chen, Jen-Shiang Kouh, and Jing-Fa Tsai // *IEEE Journal Of Oceanic Engineering.* – 2015. – Vol. 38. – № 2. – P. 211–226.
61. Drozd, J. The levels of target resources development in computer systems / Drozd J., Drozd A., Maevsky D., Shapa L. // *Proceedings of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS).* – 2014. – P. 14–19.
62. Duan, F. Induction motor parameter estimation using sparse grid optimization algorithm / Duan F., Živanović R., Al-Sarawi S., Mba D. // *IEEE Trans. Ind. Inf.* – 2016. – № 12 (4). – P. 1453–1461.
63. Emadi, A. Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles / A. Emadi, Y. J. Lee, K. Rajashekara // *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* – 2008. – Vol. 55. – № 6. – P. 2237–2245.
64. Eriksen, C. C. Seaglider: a long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research / Eriksen C. C., Osse T. J., Light R. D., Wen T., Lehman T. W., Sabin P. L., Ballard J. W., Chiodi A. M. // *Oceanic Engineering, IEEE Journal.* – 2001. – Vol. 26. – P. 424–436.
65. Fethi, Farhani Real time induction motor efficiency optimization / Farhani Fethi, Abderrahmen Zaafour, Abdelkader Chaari // *Journal of the Franklin Institute.* – 2017. – Vol. 354 (8). – P. 3289–3304.

66. Filaretov, V. Synthesis of automatic system for correction of program signal of the underwater vehicle's movement on spatial trajectory / V. Filaretov, D. Yukhimets // CD-ROM Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS 2010, KINTEX, Korea. – 2010. – P. 126–131.
67. Gan, Dong, Ojo, O. Efficiency optimizing control of induction motor using natural variables / Dong Gan, O. Ojo // IEEE Trans. Ind. Elect. – 2006. – Vol. 53. – № 6. – P. 1791–1798.
68. Gomáriz, S. An autonomous vehicle development for submarine observation / S. Gomáriz, J. Prat, J. Sole, P. Gayà // Journal of Marine Research, 2009. – Vol. 2. – P. 23–35.
69. Geisbert, J. S. Hydrodynamic modeling for autonomous underwater vehicles using computational and semi-empirical methods / J. S. Geisbert // Virginia Polytech Institute and State University, Blacksburg, 2007. – Vol. 17. – P. 247–251.
70. Ghozzi, S. Energy optimization of induction motor drives / S. Ghozzi, K. Jelassi, X. Roboam // in Proc. IEEE Conf. Industrial Technology (ICIT). – 2004. – P. 602–610.
71. Giri, F. AC electric motors control: advanced design techniques and applications / F. Giri. – Oxford: Wiley, 2013. – 578 p.
72. Gui-xi, J. Research on Intelligent Soft Starter of Asynchronous electromotor / Jia Gui-xi, Shao Hong-jun // WRI Global Congress on Intelligent Systems, Volume: 2, 2009. – P. 303–307. DOI: 10.1109/GCIS.2009.104.
73. Guo J., Chiu F.-C., Huang C.-C. Design of a sliding mode fuzzy controller for the guidance and control of an autonomous underwater vehicle // Ocean Engineering. – 2003. – Vol. 30. – P. 2137-2155.
74. Hanlon, M. Nanotube-reinforced carbon fiber Piranha USV / M. Hanlon // Gizmag. Retrieved/ – March 2010. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://newatlas.com/nanotube-reinforced-carbon-fiber-piranha-usv/14321>.
75. Heinen, S. Analyzing Energy Use with Decomposition Methods / S. Heinen // IEA Energy Training Week. – 2013. – P. 769–778.

76. Ho, Wen-Hsien Optimal course handling control for nonlinear ship maneuvering system / Wen-Hsien Ho, Chen-Huei Hsieh, Jyh-Horng Chou // International Journal of Innovative Computing, Information and Control ICIC, International. – 2010. – Vol. 6. – № 10. – P. 114–117.

77. Hu, Yaohua Generalized predictive controller design for ship track keeping / Yaohua Hu, Suwu Xu // ICCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. – 2010. – Vol. 9. – № 5. – P. 236–239.

78. Humphris, S. E. Vehicles for Deep-Sea Exploration / S. E. Humphris, A. Soule // Encyclopedia of Ocean Sciences (Third Edition), Editor(s): J. Kirk Cochran, Henry J. Bokuniewicz, Patricia L. Yager: Academic Press. – 2019. – P. 21–30. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11213-8.

79. Irving, M. Ghost marine platform takes a dive with unmanned submersible Guardian / M. Irving // Juliet Marine Systems. – October, 2016. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://newatlas.com/jms-guardian-usv/46016>.

80. Jaber, S. Aqeel A novel tuning method of PID controller for a BLDC motor based on segmentation of firefly algorithm / S. Jaber // Indian Journal of Science and Technology. – 2017. – Vol. 10 (6). P. 1–5.

81. Jen-Hwa, Guo. Экспериментальное исследование системы адаптивного формирования программных сигналов движения подводных аппаратов / Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш., Guo Jen-Hwa, Shengwei Huang // Материалы 6-ой Всероссийской мультikonференции МКПУ. – 2013. – С. 215–219.

82. Jufer, M. Electric drive: design methodology / M. Jufer. – Wiley-ISTE, 2010. – 225 p.

83. Kadiyam, J. Conceptual design of a hybrid propulsion underwater robotic vehicle with different propulsion systems for ocean observations / J. Kadiyam, S. Mohan // Ocean Engineering. – 2019. – Vol. 182. – P. 112–125. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.069.

84. Kamil, O. Real-time speed control of BLDC motor vased on fractional sliding mode controller / Kamil O., Kaan C., Abdullah B., Adnan D. // International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers. – 2016. – Vol. 4. – P. 314–318.

85. Kim, In-Gun A study on the stable sensorless control of BLDC motor inside auxiliary air compressor / Kim In-Gun, Hong Hyun-Seok, Go Sung-Chul, Ye-Jun Oh, Kyoung-Jin Joo, Ju Lee // Journal Electrical Engineering Technology. – 2016. – Vol. 12 (1). – P. 1921–1926. DOI: org/10.5370/JEET.2016.12.1.1921.

86. Khodja, D. E. Three-phases model of the induction machine taking account the stator faults / D. E. Khodja, A. Kheldoun // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2009. – № 28. – P. 157–160.

87. Khodayari, M. H. Modeling and control of autonomous underwater vehicle (AUV) in heading and depth attitude via self-adaptive fuzzy PID controller / M. H. Khodayari, S. Balochian // Journal of Marine Science and Technology. – 2015. – Vol. 20. – I. 3. – P. 559–578.

88. Kojooyan-Jafari, H. Parameter estimation of wound-rotor induction motors from transient measurements / Kojooyan-Jafari H., Monjo L., Córcoles F., Pedra J. // IEEE Trans. Energy Convers. – 2014. – № 29 (2). – P. 300–308.

89. Kooa, M.-S. Universal control of nonlinear systems with unknown nonlinearity and growth rate by adaptive output feedback / M.-S. Kooa, H.-L. Choi, J.-T. Lima // Automatica. – 2011. – Vol. 47. – P. 2211–2217.

90. Landau, I. Adaptive control: algorithms, analysis and applications (communications and control engineering) / Landau I., Lozano R., M'Saad M., Karimi A. – Springer, 2011. – 587 p.

91. Lepisto, V. Dynamic process simulation promotes energy efficient ship design / Lepisto V., Lappalainen J., Sillanpaa K., Ahtila P. // Ocean Engineering. – 2015 – Vol. 111. – P. 43–55.

92. Levi, E. Power electronics and motor drives. / E. Levi // The Industrial Electronics Handbook Second Edition. – 2011. – Vol. 3. – P. 1–31.

93. Li, J.-H. Autonomous swimming technology for an AUV operating in the underwater jacket structure environment / J.-H. Li, D. Park, G. Ki // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2019. – Vol. 11. – I. 2. – P. 679–687. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2019.02.002.
94. Liang, X. Induction motor starting in practical industrial applications / X. Liang, O. Ilochonwu // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47. – I. 1. – P. 271–280.
95. Londhe, P. S. Uncertainty and disturbance estimator based sliding mode control of an autonomous underwater vehicle / Londhe P. S., Dinesh D. D., Patre B. M., Waghmare L. M. // International Journal of Dynamics and Control. – 2017. – Vol. 5. – I. 4. – P. 1122–1138.
96. Ma, F. C. Real-Time Parameters Identification of Ship Dynamic Using the Extended Kalman Filter and the Second Order Filter / F. C. Ma, S. H. Tong // IEEE Conference on Control Applications. – 2003. – Vol. 2. – P. 1245–1250.
97. Maevsky, D. Internet of things: hierarchy of smart systems / Maevsky D., Bojko A., Maevsky D., Maevskaya E., Vinakov O, Shapa L. // IEEE 9th International Conference of Intellegent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). – 2017. – Vol. 2. – P. 821–827.
98. Masroor, S. Leader following consensus of BLDC motor speed with sampling interval / Masroor, S., Peng Chen, Zain Anwar Ali, Aamir M. // International Journal of Modeling and Optimization. – 2016. – Vol. 6. – № 2. – P. 119–123.
99. Matthews, Ch. Ship and boat building and repair, chapter 92 / Matthews Chester, Thornton James R., Mirsch Eileen, Baldwin Judi, Kiehner Caroline, Thorn Frank H., Ayres Page, Logan C. // Encyclopaedia of Occupational Health and Safety, 4th Edition. – 2015. Режим доступа: <http://www.ilocis.org/documents/chpt92e.htm>.
100. Mobley, R. Maintenance Engineering Handbook. Seventh Edition / R. Moble. – The McGraw-Hill Companies, 2008. – 457 p.
101. Mokhtar, A. S. N. Hardware implementation of a high speed inverse park transformation using CORDIC and PLL for FOC brushless servo drive /

Mokhtar A. S. N., Raez M. B. I., Marufuzzaman Mohd., Ali M. A. M. // *Elektronika ir elektrotechnika*. – 2013. – Vol. 19. – № 3. – P. 23–26.

102. Mullick, J. A. Fuzzy controller for speed control of BLDC motor using MATLAB / J. A. Mullick // *International Research Journal of Engineering and Technology*. – 2017. – Vol. 4. – № 2. – P. 1270–1274.

103. Nag, A. Fuzzy logic based depth control of an autonomous underwater vehicle / A. Nag, S. Patel, S. Akbar // *International multi-conference on automation, computing, communication, control and compressed sensing*. – 2013. – P. 117–123.

104. Noyal Doss, M. A. Reduction in cogging torque and flux per pole in BLDC motor by adapting U-clamped magnetic poles / Noyal Doss M. A., Vijayakumar S., Mohideen A. J., Kannan K. S., Sairam N. D. B., Karthik K. // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. – 2017. – Vol. 8. – № 1. – P. 297–304.

105. Odegard, V. Nonlinear identification of ship autopilot models / V. Odegard // *Norwegian University of Science and Technology*. – 2009. – P. 100–107.

106. Onishchenko, O. Decision support system in assessing technical design and tender purchases / O. Onishchenko, O. Mazur // *Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa)*. – 2016. – № 1 (5). – P. 91–100.

107. Phillips, A. B. Understanding the power requirements of autonomous underwater systems, Part I: An analytical model for optimum swimming speeds and cost of transport / Phillips A. B., Haroutunian M., Murphy A. J., Boyd S.W., Blake J. I. R., Griffiths G. // *Ocean Engineering*. – 2017. – Vol. 133. – P. 271–279. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.12.014.

108. Pipchenko, A. D. Vessel heading robust automatic controller for varying conditions / A. D. Pipchenko, V. A. Shevchenko // *Marine Intellectual Technologies*. – 2018. – № 4 (42). – I. 4. – P. 208–214.

109. Prado, A. Phase-mode transformation matrix application for transmission line and electromagnetic transient analyses / A. Prado, S. Kurokawa, L. Bovolato, J. Filho. – New York: Nova Science Pub Inc, 2011. – 40 p.

110. Ru-jian, Yan Development and missions of unmanned surface vehicles / Ru-jian Yan, Pang Shuo, Sun Han-bing, Pang Yong-jie // *Journal of Marine Science and Application*. – 2010. – Vol. 9. – № 4. – P. 451–457.
111. Sahoo, A. Advancements in the field of autonomous underwater vehicle / A. Sahoo, S. K. Dwivedy, P.S. Robi // *Ocean Engineering*. – 2019. – Vol. 181. – P. 145–160. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.011.
112. Salleh, Zulhisyam Modeling and simulation of three phase induction motor / Zulhisyam Salleh, Mohd Aly Rajaie Halim // *Seminar PMK*. Politeknik Melaka. – 2012. – P. 1–8.
113. Sandhu, K. S. Simulation study of three phase induction motor with variations in moment of inertia / K. S. Sandhu, V. Pahwa // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2009. – Vol. 4. – № 6. – P. 72–77.
114. Santhakumar, M. Modeling, simulation and model reference adaptive control of autonomous underwater vehicle-manipulator systems / M. Santhakumar, J. Kim // *International conference on control, automation and systems (ICCAS)*. – 2011. – P. 643–648.
115. Schwab, K. *The Fourth Industrial Revolution* / K. Schwab. – Geneva: World Economic Forum, 2016. – 192 p.
116. Scott, St. A. *System Analysis – Rank and Nullity* / St. A. Scott // *Matrices Handouts*. Pennsylvania State University. Retrieved 3. – April, 2017.
117. Singh, S. Kr. Optimization of PID controller for brushless DC motor by using Bio-inspired algorithms / S. Kr. Singh, N. Katal, S. G. Modani // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. – 2014. – Vol. 7. – № 7. – P. 1302–1308.
118. Sheng, L. Identification of Ship Steering Dynamics Based on ACA-SVR / Sheng L., Jia S., Bing L., Gao-Yun L. // *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. – 2008. – P. 514–519.
119. Shi, K. L. Modeling and simulation of three phase induction motor using SIMULINK / Shi K. L., Chan T. F., Wang Y. K, Ho. S. L. // *International journal of electrical engineering education*. – 2009. – Vol. 36. – P. 163–172.

120. Srinivasan, K. Power quality analysis of Vienna rectifier for BLDC motor drive application / Srinivasan K., Vijayan S., Paramasivam S., Sundaramoorthi K. // *International Journal of Power Electronics and Drive System*. – 2016. – Vol. 7. – №. 1. – P. 7–16.
121. Tavares, Durval The Hybrid AUV/ROV / Durval Tavares // *Marine Technology Reporter*. – 2017. – Vol. 60. – № 8. – P. 48–49.
122. Thangaraj, C. Energy efficient control of three phase induction motor a review / C. Thangaraj, S. P. Srivastava, Pramod Agarwal // *International journal of computer and electrical engineering*. – 2009. – Vol. 1. – № 1. – P. 61–70.
123. The Manoeuvring Committee Final Report and Recommendations to the 24th ITTC. – 2005. – Vol. 1, UK. – P. 137–198.
124. Tomera, M. Nonlinear controller design of a ship autopilot / M. Tomera // *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci*. – 2010. – Vol. 20. – №. 2. – P. 271–280.
125. Topaloglu, I. Closed-loop speed control of PM-BLDC motor fed by six step inverter and effects of inertia changes for desktop CNC machine review / Topaloglu I., Korkmaz F., Mamur H., Gurbuz R. // *Elektronika ir elektrotechnika*. – 2013. – Vol. 19. – №. 1. – P. 7–10.
126. Truong Quang Dinha. Optimal control and real-time simulation of hybrid marine power plants. Optimal control and real-time simulation of hybrid marine power plants / Truong Quang Dinha, Truong Minh Ngoc Buia, James Marcoa, Chris Watts // In: 14th International Naval Engineering Conference and Exhibition 2018. – Glasgow, UK, 2-4 Oct 2018. – P. 1–14. The university of Warwick / Warwick Research Publications. URL: <http://wrap.warwick.ac.uk/108490>.
127. Trunov, A. Recurrent transformation of the dynamics model for autonomous underwater vehicle in the snertial coordinate system review / A.Trunov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 2/4 (86). – P. 39–47. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.95783.
128. Tunyasrirut, S. Phase control thyristor based soft–starter for a grid connected induction generator for wind turbine system / Satean Tunyasrirut, Boonreung Wangsilabatra, Tianchai Suksri // *Control Automation and Systems (ICCAS), International Conference*. – 2010. – P. 529 – 534.

129. Vichuzhanin, V. Realization of a fuzzy controller with fuzzy dynamic correction / V. Vichuzhanin // *Central European Journal of Engineering*. – 2012. – Vol. 2. – №. 3. – P. 392–398.

130. Vittek, J. Decomposed sliding control of the drive with internal permanent magnet synchronous motor and flexible coupling / J. Vittek, S. Ryvkin // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2013. – Vol. 2013, Article ID 680376. – P. 2011–2018.

131. Xilin, Y. Nonlinear position controller for maritime operations of rotary-wing UAVs / Y. Xilin, G. A. Matthew // *Proc. of 18-th IFAC Congress, Milan, Italy*. – 2013. – P. 1510–1515.

132. Yeh, C. Demerdash NAO Fault tolerant soft starter control of induction motor with reduced transient torque pulsations / C. Yeh // *IEEE Trans Energy Convers.* – 2009. – Vol. 24 (4). – P. 22–32.

133. Yuh, J. Applications of marine robotic vehicles / J. Yuh, G. Marani, R. Blidberg // *Intellegent Service Robotics*. – 2011. – Vol. 2. – P. 221–231.

134. Zan, Y. Research on real-time simulation system of ship motion based on Simulin / Y. Zan // *Open Mechanical Engineering Journal*. – 2014. – Vol. 8. – P. 820–827.

135. Zeraoulia, M., Benbouzid, M. E. H., Diallo, D. Electric motor drive selection issues for the HEV propulsion systems: a comparative study / M. Zeraoulia, M. E. H. Benbouzid, D. Diallo // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2006. – Vol. 55. – № 6. – P. 1756–1764.

136. Zhang, P. A nonintrusive winding heating method for induction motor using soft starter for preventing moisture condensation / Zhang P., Du Y., Habetler T. G., Lu B., // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2012. – № 48 (1). – P. 117–123.

137. Zhou, Y. Design for a motor controller in hybrid electric vehicle based on vector frequency conversion technology / Zhou Y., Lian J., Ma T., Wang W. // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2010. – Vol. 2010. Article ID 627836. – P. 13–26.

138. Агарков, С. А. Параметрическая идентификация обобщенной модели Номото с помощью аппарата вариационного исчисления / С. А. Агарков, С. В. Пашенцев // Вестник МГТУ. – 2015. – № 1. – Т. 18. – С. 7–11.

139. Агеев, М. Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / М. Д. Агеев. – М.: Наука, 2005. – 398 с.

140. Андриенко, Н. Н. Концептуальные подходы к созданию лифтов отечественного производства / Н. Н. Андриенко, В. Ф. Семенюк // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2011. – № 3. – С. 29–30.

141. Андрющенко, О. А. Пассажирский лифт как электромеханическая система. Перспективы и проблемы совершенствования энергетических показателей / О. А. Андрющенко, В. В. Булгар, В. Ф. Семенюк // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2010. – № 2. – С. 23–28.

142. Антонов, В. А. Теоретические вопросы управления судном / В. А. Антонов, М. Н. Письменный. – Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2007. – 78 с.

143. Бабакин, В. И. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / В. И. Бабакин. – Уфа: УГНТУ, 2007. – 224 с.

144. Батоврин, В. К. Управление жизненным циклом технических систем: серия докладов / Батоврин В. К., Бахтурин Д. А., Мацкевич И. С., Липецкая М. С. – СПб.: Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад», 2012. – Вып. 1. – 59 с.

145. Бідюк, П. І. Проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень / П. І. Бідюк, Л. О. Коршевніюк. – Київ: ННК «ІПСА», 2010.–340 с.

146. Блинцов, В. С. Современные проблемы создания электрооборудования и автоматики подводных аппаратов / В. С. Блинцов // Радиоелектронні комп'ютерні системи. – 2007. – № 5 (24). – С. 90–98.

147. Блінцов, С. В. Автоматичне керування автономними підводними апаратами в умовах невизначеності / С. В. Блінцов. – Миколаїв: ТОВ «Фірма «Гліон», 2008. – 204 с.

148. Бобков, В. А. Программный комплекс моделирования пространственного движения автономного подводного аппарата / Филаретов В. Ф., Бобков В. А., Юхимец Д. А., Мельман С. В., Борисов Ю. С. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 1. – С. 8–13.

149. Богданова, А. В. Сужение множества Парето на основе простейших наборов нечеткой информации об относительной важности критериев / А. В. Богданова, В.Д. Ногин // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2007. – Сер. 10. – Вып. 2. – С. 17–33.

150. Бойко, А. А. Анализ возможности экономии энергии потребляемой лифтовыми лебедками при применении тиристорных преобразователей напряжения / А. А. Бойко // Науково-технічний та виробничий журнал «Підйомно-транспортна техніка. – 2014. – Вып. 3 (43). С. 89–93.

151. Бойко, А. А. Синтез и исследование системы автоматического симметрирования токов асинхронного двигателя с преобразователем напряжения / Бойко А. А., Будашко В. В., Юшков Е. А., Бойко Н. А. // Восточно–европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 1/2 (79). – С. 22–34.

152. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 256 с.

153. Бродецкий, Г. Л. Возможности метода последовательных уступок при выборе решения по многим критериям / Бродецкий Г. Л., Гусев Д. А., Мазунина О. А., Фель А. В. // Логистика и управление цепями поставок. – 2017. – № 3 (80). – С. 91–105.

154. Будашко, В. В. Физическое моделирование многофункционального пропульсивного комплекса / В. В. Будашко, О. А. Онищенко, Е. А. Юшков // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). – 2014. – № 2. – С. 88–92.

155. Будашко, В. В. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу / В. В. Будашко, Е. А. Юшков, О. А. Онищенко // Вістник НТУ «ХПІ». – 2014. – №. 38 (1081). – С. 45–51.
156. Будашко, В. В. Математические основы имитационного моделирования системы управления энергетической установкой бурового судна / В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2014. – Вып. 29. – С. 6–13.
157. Буренок, В. М. Развитие военных технологий XXI века: проблемы планирование, реализация / В. М. Буренок, А. А. Ивлев, В. Ю. Корчак. – Тверь: Издательство ООО «КУПОЛ», 2009. – 624 с.
158. Бухановский, А. В. Метаонтология исследовательского проектирования морских подвижных объектов / А. В. Бухановский, Ю. И. Нечаев // Онтология проектирования. – 2012. – № 1. – С. 53–64.
159. Букарос, А. Ю. Сравнительный анализ методов идентификации параметров схем замещения однофазных электродвигателей / А. Ю. Букарос, О. А. Онищенко // Вісник СевДТУ. Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. – 2008. – № 88. – С. 124–128.
160. Вагущенко, Л. Л. Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. – М.: ТрансЛит, 2007. – 376 с.
161. Василевський, О. М. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник / О. М. Василевський, В. О. Поджаренко. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 129 с.
162. Васьковський, Ю. М. Польовий аналіз електричних машин. Навчальний посібник / Ю. М. Васьковський. – Київ: НТУУ «КПІ», 2007. – 190 с.
163. Войтех, О. А. Вибір та адаптація серійних асинхронних двигунів для роботи від джерел регулюємої частоти / О. А. Войтех, О. М. Попович // Пр. Інституту електродинаміки НАН України. – 2003. – № 3. – С.34–39.
164. Волянський, С. М. Удосконалення автоматичного керування рушійно-кермовим комплексом підводного апарата / В. С. Блінцов,

С. М. Волянський // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Сб. наук. праць НТУ «ХПІ». – 2015. – С. 238–243.

165. Волянский С. М. Синтез математической модели движительно-рулевого комплекса подводного аппарата как объекта управления [Электронный ресурс] // Вісник Національного університету кораблебудування. – 2014. – № 2 – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.15589.evn20140305>. – 5.03.2014 г.

166. Голиков, В. А. Развитие современной теории и практики технической эксплуатации морского и речного флота: концепции, методы, технологии / В. А. Голиков, О. А. Онищенко // Суднові енергетичні установки. – 2017. – № 37. – С. 13–27.

167. Голиков, В. В. Особенности проектирования многоцелевого судна двойного назначения ледового класса / В. В. Голиков, О. Н. Мазур, О. А. Онищенко // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2016. – № 42 (1214). – С. 29–37.

168. Горелик, В. А. Теория принятия решений / В. А. Горелик. – М.: МПГУ, 2016. – 152 с.

169. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.

170. Дресвянников, В. А. Особенности жизненных циклов различных экономических систем / В. А. Дресвянников // Издательская группа «Дело и сервис». – 2008. Режим доступу: <https://dis.ru/library/557/26780>.

171. Егупов, Н. Д. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления: учебник – 2-е изд. Под ред. Егупова Н. Д. / Н. Д. Егупов. – Москва: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 с.

172. Еруланова, А. Е. Синтез системы автоматического управления методами расширенных частотных характеристик и компенсации динамики объекта и возмущений / А. Е. Еруланова // Альманах современной науки и образования. – 2013. – № 6 (73). – С. 57-61.

173. Зарубин, В. С. Математическое моделирование в технике / В. С. Зарубин, А. П. Крищенко – Москва: Изд-во МГТУ, 2001. – 496 с.

174. Зенкевич, С. Л. Основы управления манипуляционными роботами / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. – Москва: Изд-во МГУ им. Баумана, 2004. – 480 с.

175. Иванов, В. Г. К вопросу выбора электродвигателей гребных электроприводов необитаемых подводных аппаратов / В. Г. Иванов, И. В. Степанов, А. А. Томов // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 2 (40). – Т. 2. – С. 52–59.

176. Изранцев, А. В. Навигация и управление в подводном пространстве / Изранцев А. В., Киселев Л. В., Матвиенко Ю. В., Ваулин Ю. В. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – Вып. 11. – С. 68–74.

177. Кавалло, Э. Особенности конструкции и системы управления автономного подводного аппарата с одним движителем для его точного перемещения в пространстве / Кавалло Э., Миккеллини Р., Юхимец Д. А., Филаретов В. Ф. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 6. – С. 98–107.

178. Карпович, О. Я. Особенности реализации датчика обратной связи по скорости и положению в вентильно-индукторном электроприводе / О. Я. Карпович, О. А. Онищенко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – № 11. – С. 65–70.

179. Карпович, О. Я. Вентильно-индукторный электропривод с адаптивной системой управления для компрессоров малых холодильных установок / О. Я. Карпович, О. А. Онищенко, И. Н. Радимов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Випуск 3/2012 (19). – С. 150–152.

180. Карпович, О. Я. Верификация математической модели вентильно-индукторного электродвигателя микрокомпрессора / О. Я. Карпович, О. А. Онищенко // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2011. – № 24. – С. 77–82.

181. Карпович, О. Я. Экспериментально-отладочная схема управления вентильно-индукторным электродвигателем / О. Я. Карпович, А. С. Порайко,

О. А. Онищенко // Труды Донецкого национ. технич. ун-та. – 2003. – № 67. – С. 152–155.

182. Карпович, О. Я. Разработка моделей с упрощенными контурами тока для вентильно-индукторного микроэлектропривода / О. Я. Карпович, О. А. Онищенко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2004. – № 43. – С. 91–94.

183. Карпович, О. Я. Двухквadrантный вентильно-индукторный электропривод / О. Я. Карпович, О. А. Онищенко, И. Н. Радимов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2003. – № 5 (22). – С. 56–60.

184. Киселев, Л. В. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований [Текст] / Л. В. Киселев, А. В. Инзарцев, Ю. В. Матвиенко // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 1. – С. 6–17.

185. Клдиашвили, В. И. Методика пересчета параметров электродвигателя для регулируемого асинхронного электропривода транспортных средств / Клдиашвили В. И., Натришвили Г. М., Шермазанашвили А. Г., Мебония С. А. // Архивариус. – 2015. – № 3 (3). – С. 86–89.

186. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин. Учебник / Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.

187. Король, Ю. М. Влияние гидродинамических потерь на механические характеристики капсулированных управляемых асинхронных двигателей подводных аппаратов / Ю. М. Король // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – 2004. – № 6. – С. 15–24.

188. Кравчук, О. І. Визначення напрямків роботизації Збройних Сил України на основі аналізу програм розвитку озброєння і військової техніки передових країн світу / О. І. Кравчук, С. С. Ковалішин // Збірник наукових праць Військової академії Сухопутних військ. – Одеса. – 2017. – №1 (7). – С. 118–126.

189. Краморенко, А. В. Критерии сравнения характеристик подводных аппаратов с точки зрения возможности выполнения ими подводных работ: материалы XIII Международной научно-технической конференции / А. В. Краморенко, А. Н. Скакун // Современные методы и средства океанологических исследований. – 2013. – С. 316–319.

190. Лебедев, А. В. Анализ системы второго порядка с переменной структурой и неидеальностью переключающего устройства / А. В. Лебедев, В. Ф. Филаретов // Автометрия. – 2009. – № 2. – Т. 42. – С 21–28.

191. Левин, М. И. Лекции по экономике коррупции: учеб. пособие / Левин М. И., Левина Е. А., Покатович Е. В. // Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: Изд. ВШЭ, 2011. – 356 с.

192. Логишев, И. В. Управление технической эксплуатацией флота / И. В. Логишев, О. А. Онищенко. – Одесса: «Феникс», 2016. – 232 с.

193. Лозинський, О. Ю. Критерії стійкості систем з нечіткими регуляторами / О. Ю. Лозинський // Проблеми автоматизированного електропривода. Теорія і практика: сб. науч. тр. / Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». – 2003. – С. 510-511.

194. Локарев, В. И. Зависимости для инженерного расчета энергетических характеристик асинхронных электродвигателей при решении задач энергосбережения / В. И. Локарев, Я. Б. Волянская // Электромашинобудування та електрообладнання. Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 2004. – Вип. 62. – С. 9–13.

195. Лукомский, Ю. А. Навигация и управление движением судов: учебник / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов – СПб.: Элмор, 2002. – 360 с.

196. Лютаревич, А. Г. Вопросы моделирования устройств обеспечения качества электрической энергии / Лютаревич А. Г., Горюнов В. Н., Долингер С. Ю., Хацевский К. В. // Омский научный вестник. – 2013. – № 1 (117). – С. 168–173.

197. Мазур, О. М. Підвищення ефективності технічного обслуговування і ремонту багатоцільових суден подвійного призначення /

О. М. Мазур, Т. С. Обнявко // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація: матеріали конф. з міжнар. участю. – Одеса, 2017. – С. 45–47.

198. Макаренко, С. И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития / С. И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 2. – С. 73–132.

199. Марченко, А. А. Экспериментальные исследования процесса искусственного нагружения судовых асинхронных электродвигателей / А. А. Марченко, С. Ю. Труднев // Вестник Камчатского ГТУ. – 2016. – № 38. – С. 16–22.

200. Марченко, А. А. Исследование модели асинхронного электродвигателя на возможность нагружения при помощи понижения частоты питающего напряжения / А. А. Марченко, О. А. Онищенко, С. Ю. Труднев // Вестник Камчатского ГТУ. – 2014. – № 29. – С. 17–24.

201. Мутанов, Г. К. Сравнительный анализ методов разработки систем автоматического регулирования / Г. К. Мутанов, Н. В. Шадрин, А. Н. Аринова // Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева – Усть-Каменогорск. – 2010. – № 2. – С. 110–117.

202. Недбай, А. А. Основы квалиметрии. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / А. А. Недбай, Н. В. Мерзликина. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 126 с. Режим доступа: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/104/u_course.pdf.

203. Ногин, В. Д. Обобщенный принцип Эджворта-Парето и границы его применимости / В. Д. Ногин // Экономика и математические методы. – 2005. – № 3. – Т. 41. – С. 128–134.

204. Ногин, В. Д. Обобщенный принцип Эджворта-Парето в терминах функций выбора / В. Д. Ногин // Методы поддержки принятия решений. – 2005. – С. 43–53.

205. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход (2-е изд., испр. и доп.) / В. Д. Ногин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005 – 273 с.

206. Ногин, В. Д. Проблема сужения множества Парето: подходы к решению / В. Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2008. – № 1. – С. 98–112.

207. Обнявко, Т. С. Визначення ефективності тендерних проектів у військовій економіці методами економетрики / Т. С. Обнявко, О. А. Онищенко // Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки». – 2014. – № 9. – С. 212–218.

208. Обнявко, Т. С. Методика підтримки прийняття рішень при закупівлях і проектуванні спеціальних засобів та обладнання / Т. С. Обнявко // Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство. – 2016. – № 8 (2). – С. 33–39.

209. Огай, С. А. Понятия многоцелевого судна ледового плавания и особенности применения системного подхода при определении характеристик на начальном этапе проектирования судна этого типа / С. А. Огай // Морские интеллектуальные технологии. – 2015. – Т. 1. – № 3 (29). – С. 45–54.

210. Онищенко, О. А. Электропривод систем конденсации холодильных установок / О. А. Онищенко // Электромашиностроение и электрооборудование, 2006 – № 66. – С.190–192.

211. Острецов, Г. Э. Методы автоматизации управления движением корабля / Г. Э. Острецов, Л. М. Клячко. – М.: Физматлит, 2009. – 120 с.

212. Пашенцев, С. В. Параметрическая идентификация маневренных характеристик по результатам натуральных испытаний вида «Зигзаг» в нелинейной модели управляемости судна / С. В. Пашенцев // Вестник МГТУ. – 2010. – № 4/1. – Т. 13. – С. 730–735.

213. Пинчук, О. Г. Энергетические показатели асинхронного двигателя при различных параметрах несимметрии питающего напряжения / О. Г. Пинчук // *Електротехніка і енергетика. Наукові праці ДонНТУ.* – 2008. – Вып. 8 (140). – С. 201–205.

214. Плугатар, О. П. Економічні аспекти створення нових енергоефективних асинхронних електродвигунів для роботи з перетворювачами частоти / О. П. Плугатар, В. О. Войтех // *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр.* – 2010. – Вип. 27. – С. 68–70.

215. Преобразователи частоты для управления двигателями переменного тока [Электронный ресурс] / Кабель Инвест // *Каталог оборудования.* – 2011. – С. 1.

216. Присмотров, Н. И. Электропривод ручного электроинструмента по системе преобразователь частоты асинхронный двигатель / Н. И. Присмотров, В. Н. Ларионов // *Вестник ЧГУ.* – 2005. – № 2. – С. 37–45.

217. Прокопов, С. В. Экономика-математическое моделирование в производственном менеджменте / С. В. Прокопов. – К.: ИМСО, 2017. – 438 с.

218. Романов, В. Н. Техника анализа сложных систем / В. Н. Романов. – СПб.: СЗТУ, 2011. – 287 с.

219. Романовский, Г. Ф. Современное состояние и перспективы развития подводных аппаратов в Украине / Г. Ф. Романовский, В. С. Блинцов, И. А. Родин // *Proceedings of the 5-th International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems.* – Szczecin, 2004. – Vol. 2. – P. 107–117.

220. Рутковская, Д. В. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. В. Рутковская, М. В. Пилиньский, Л. В. Рутковский – Москва: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.

221. Сагалевич, А. М. Подводные аппараты в научных исследованиях и подводно-технических работах / А. М. Сагалевич // *Современные методы и*

средства океанологических исследований: материалы XII Межд. науч.-техн. конф., Москва, 12–14 апреля 2011 г. – Москва, 2011. – С. 18–20.

222. Сапіга, В. В. Воєнно-географічні умови регіону Азовського моря в контексті застосування сил (військових засобів) ВМС. / В. В. Сапіга, О. А. Ігнатенко // Наука і оборона (Теорія воєнного мистецтва). – Київ: НУО ім. Черняхівського, 2019. – № 1. – С. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2019-6-1-16-24>.

223. Седова, Н. А. Интеллектуальная система автоматического управления курсом судна / Н. А. Седова // Транспортное дело России. Спецвыпуск. – 2006. – № 7. – С. 58–61.

224. Снопков, В. И. Управление судном / В. И. Снопков. – СПб.: Професионал, 2004. – 536 с.

225. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.

226. Филаретов, В. Ф. Устройства и системы управления подводных роботов / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, Д. А. Юхимец – М.: Наука, 2005. – 270 с.

227. Фролов, С. М. Безкіпажні катера для Військово-Морських Сил Збройних Сил України / С. М. Фролов, А. М. Гриценко // Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції, Київ, 09–12 жовтня 2016 р. – Київ, 2016. – С. 45–48.

228. Цветков, В. Я. Сложные технические системы / В. Я. Цветков // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – № 3 (20). – С. 86–92.

229. Шандров, Б. В. Технические средства автоматизации: учебник для вузов / Б. В. Шандров, А. Д. Чудаков – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.

230. Шевченко, В. А. Эксплуатация судовых технических комплексов с двигателями MAN B&W-ME: Монография / В. А. Шевченко: под редакцией проф. О. А. Онищенко. – Одесса: ТЭС, 2019. – 400 с. ISBN 978-617-7711-21-5.

231. Шibaева, Н. О. Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению логистическими транспортными процессами / Шibaева Н. О., Вычужанин В. В., Рудниченко Н. Д., Шibaев Д. С. // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса. – 2018. – С. 168–175.

232. Шушляпин, Е. А. Нелинейные регуляторы для удержания судна на заданной траектории при «сильных» маневрах / Шушляпин Е. А., Карапетьян В. А., Безуглая А. Е., Афолина А. А. // Труды СПИИРАН. – 2017. – Вып. 4 (53). – С. 178–200.

233. Юдин, Ю. И. Математические модели плоскопараллельного движения судна. Классификация и критический анализ / Ю. И. Юдин, И. И. Сотников. – Мурманск, 2006. – 95 с.

234. Юдин, Ю. И. Идентификация математической модели судна / Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев. – М.: Моркнига, 2015. – 141 с.

235. Юхимец, Д. А. Разработка методов синтеза адаптивных систем управления пространственным движением подводных аппаратов / А. В. Лебедев, В. Ф. Филаретов, Д. А. Юхимец // Сб. научных статей ИАПУ ДВО РАН. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН. – 2011. – С. 82–95.

236. Яким'як, С. В. Проблемні питання розвитку Військово-Морських Сил Збройних Сил України у сучасних умовах. Реформа та модель ВМС ЗС України / С. В. Якім'як // Матеріали оперативно-стратегічного семінару (в межах міжнародного наукового форуму «Морська стратегія держави. Розвиток та реалізація морського потенціалу України», Київ 28 квітня 2015 р. – Київ, 2015. – С. 35–45.

237. Пересчет асинхронных двигателей на другое напряжение, частоту вращения и частоту питания [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://helpiks.org/6-38776.html>.

238. Поисковые исследования штормовой мореходности корабля: [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://khramushin.narod.ru/Vlad_R1.html#c12a.

239. XXI век: новые концепции, технологии, исследования, разработки // Зарубежное военное обозрение: журнал. – 2016. — Июль (№ 07). – С. 113.

240. Anti-Submarine Warfare Continuous Trail Unmanned Vehicle (ACTUV) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.dailytechinfo.org/military/4394-opublikovany-podrobnosti-proekta-sozdaniya-sudov-robotov-ohotnikov-za-podvodnymi-lodkami.html>.

241. AUV62-AT. Target simulation for realistic ASW training [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://saab.com/naval/underwater-systems/autonomous-underwater-vehicles/auv62_at.

242. CRACUNS: дрон, вынырывающий из глубины [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://hightech.fm/2016/03/22/drone-cracuns>.

243. Executive Summary World Robotics 2018 Service Robots. International Federation of Robotics IFR [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ifr.org/free-downloads>.

244. Juliet Marine Systems [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://julietmarine.com/AboutUs.htm>.

245. Iver3 Standard AUV [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ocean-server.com/iver3>.

246. Komputernoe_modelirovanie_asinhronnyh_dvigateli_i_transformatorov.pdf [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.rgups.ru/site/assets/files/50215>.

247. Ocean Business C-Worker 5 Demonstration [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://youtu.be/xcohhN71fIU>.

248. Overall Equipment Effectiveness [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.oee.com>.

249. Robotic Studio [Электронный ресурс] [Текст]: вебсайт содержит информацию о среде разработки Microsoft Robotic Studio / Microsoft Corporation. – Электр. дан. – 2011 – Режим доступа <http://www.microsoft.com/robotics>.

250. RobSim – программный комплекс для моделирования роботов и обучения операторов [Электронный ресурс] [Текст]: вебсайт содержит информацию о моделирующем комплексе RobSim / НИКИМТ ИТУЦР – Электр. дан. – 2011. – Режим доступа <http://www.robsim.dynsoft.ru>.

251. Podvodnye ubijcy avianoscev: glubinnye bespilotniki. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://tvzvezda.ru/news/forces/content/201504271716-4r23.htm>.

252. Webots – программное обеспечение для моделирования мобильных роботов [Электронный ресурс] [Текст]: вебсайт содержит информацию о моделирующем комплексе Webots / Cyberrobotics – Электр. дан. – 2013. – Режим доступа: www.cyberbotics.com.

253. Будашко, В. В. Система імпульсно-фазового управління електроприводом суднової гвинто-кермової установки. / В. В. Будашко, Є. О. Юшков. // Патент на корисну модель № 108074, 26.06.2016. <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=224863>.

254. Будашко В. В., Черных И. К., Черных Я. И. Устройство для управления электроприводом / RU Patent 1529186. – 4385313/24-24. – 1989/12/15.

255. Букарос А. Ю. Асинхронный двигатель для частотно-регулируемого электропривода. / А. Ю. Букарос, О. А. Онищенко // Пат. 66073 Україна, МПК (2011.01) H02K 17/00, u2011 06058. Заявл. 16.05.2011, опубл. 26.12.2011. – Бюл. № 24, 2011.

256. Букарос А. Ю., Онищенко О. А. Коректор коефіцієнта потужності для частотно-регулируемого электропривода. Пат. UA80520 Украина, МПК6 H02M 1/42. № u201204086; Заявл. 03.04.2012; опубл. 10.06.2013.

257. Будашко В. В., Николаев И. Н., Савельев А. Е., Черных И. К. Устройство для управления электроприводом / RU Patent 1582310. – 4401433/24-07. – 1990/7/30.

258. Пат. JP10285888 (A) Япония, МПК6 H02K 17/16. High frequency induction motor / Kodera Hiroji (Япония); заявитель и патентообладатель Kodera Denshi Seisakusho КК. – №JP19970098505; заявл. 31.03.1997; опубл. 23.10.1998.

259. Електрична машина бііндукторного типу (варіанти): пат. 116924 Україна. № а201606821; заявл. 22.06.2016; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10 (кн. 1). 46 с.

260. Морська доктрина України на період до 2035 року, затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 7 жовтня 2009 року № 1307, у редакції постанови Кабінету Міністрів України від 18 грудня 2018 р.

261. Постанова Кабінету Міністрів України від 13.10.2015 № 1168-р «Про затвердження плану першочергових заходів з облаштування державного кордону вздовж берегової лінії та забезпечення охорони територіального моря України в межах Донецької, Запорізької, Херсонської та Миколаївської областей».

262. Указ Президента України № 320/2018 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 12 жовтня 2018 року «Про невідкладні заходи щодо захисту національних інтересів на Півдні та Сході України, у Чорному та Азовському морях і Керченській протоці».

ДОДАТОК А
Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

Міністерство освіти і науки України

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор НУК

проф. С.С. Рижков

_____ 2014р.



АКТ

вводу в експлуатацію навчально-дослідницької лабораторії №20 «Теоретичних
 основ електропривода та силової перетворювальної техніки»

м. Миколаїв

«27» 08 2014р.

Ми, що підписались нижче, комісія у складі завідуючого кафедрою ЕОСтаІБ д.т.н., проф. Блінцова В.С., к.т.н., доцента кафедри ЕОСтаІБ Костенка Д.В., завідувача лабораторіями кафедри ЕОСтаІБ Роздільського В.М. склали цей акт про наступне.

У приміщенні №20 Нового корпусу НУК ім. адм. Макарова загальною площею 15 кв. м. введена в експлуатацію учбово-дослідницька лабораторія «Теоретичних основ електропривода та силової перетворювальної техніки». Лабораторія оснащена сучасними навчальними та навчально-дослідницькими лабораторними стендами (автори розробок к.т.н., доц. Волянська Я.Б., асистент Волянський С.М. під науковим керівництвом д.т.н., проф. Блінцова В.С.). Лабораторне обладнання призначене для використання при проведенні лабораторних і практичних робіт з дисциплін «Теорія електропривода», «Силові

перетворювачі АЕП» за напрямом 6.050702 «Електромеханіка» спеціальностей «Електричні системи і комплекси транспортних засобів» та «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», а також для проведення бакалаврських, магістерських і аспірантських досліджень.

Список обладнання лабораторних стендів додається.

Голова комісії

зав. кафедри ЕОСтаІБ
проф., д.т.н.

В.С. Блінцов

Члени комісії:

к.т.н., доцент каф. ЕОСтаІБ

Д.В. Костенко

зав. лабораторіями
кафедри ЕОСтаІБ

В.М. Роздільський

Список обладнання лабораторних стендів учбово-дослідницької лабораторії №20
«Теоретичних основ електропривода та силової перетворювальної техніки»

№ п/п	Назва пристрою	Серія	Кількість, шт
1	блок живлення 5В 1А, 15В 1А, -15В 1А, +18В 0,1А, +110В 1А, +24В 2А		6
2	плата електронних реле (3 реле часу і 1 реле струму)		2
3	плата секундоміра з роздільною здатністю 0,1 с		2
4	плата блоку управління і регулятора тиристора напруги		2
5	плата випрямлячів		2
6	блок реле		2
7	автотрансформатор		2
8	амперметри постійного і змінного струму		6
9	вольтметр		2
10	вимірювач швидкості		2
11	двигун постійного струму	СЛ- 221	2
12	двигун змінного струму	УАД- 052	2
13	тахогенератор		2
14	блок силовий змінного струму		1
15	блок силовий постійного струму		1
16	блок сполучення(плата РСІ 1710L)		1
17	блок гальванічної розв'язки		1
18	блок виміру частоти обертання		1
19	клемна колодка до плати сполучення		1
20	кабель подовжувальний 1,5м, 68-піновий		1
21	машина змінного струму асинхронний двигун з короткозамкненим ротором	АОМ 24-4, 0,45кВт, 1500 об/хв.	1
22	машина постійного струму	П-12М, 0,44кВт, 1500об/хв.	1
23	станина		1
24	комплект сполучних кабелів		1
25	розділовий знижувальний трансформатор 380/220В		1

Голова комісії

зав. кафедри ЕОСтаІБ
проф., д.т.н.

В.С. Блінцов

Члени комісії:

к.т.н., доцент каф. ЕОСтаІБ

Д.В. Костенко

зав. лабораторіями
кафедри ЕОСтаІБ

В.М. Роздільський

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник начальника Військової академії з наукової роботи – начальник відділення, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,

полковник  О. І. Кравчук

« ___ » _____ 2017 р.

ДОВІДКА

Цим підтверджується, що результати дисертаційного дослідження «Наукове обґрунтування і розробка автоматизованих систем керування електрорушіями суден спеціального призначення» здобувача Волянської Я.Б. заслухано та обговорено на засіданнях наукового Семінару "Оптимальне управління і експлуатація електроприводів спеціальних установок" Вченої Ради Національної академії наук України з проблеми «Наукові основи електроенергетики» (Військова академія, м. Одеса) у 2015-2017 роках.

У ході апробації на наукових Семінарах встановлено, що результати дисертаційного дослідження Волянської Я.Б. мають актуальність, наукову новизну та практичну значимість при проектуванні, розробці та експлуатації судових електромеханічних систем різного призначення, зокрема автоматизованих систем керування електрорушіями суден спеціального призначення.

Учений секретар семінару,

зав. лабораторією, працівник ЗСУ



Т. С. Обнявко

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Ректор Національного
університету кораблебудування
ім. адмірала Макарова

проф. С. С. Рижков
2017 р.



АКТ

про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Волянської Яни Богданівни

Комісія, у складі проф., д.т.н. Локарева В. І., доцента, к.т.н. Овсянникова В. М., завідувача лабораторіями кафедри електрообладнання суден та інформаційної безпеки (ЕОС та ІБ) Роздільського В. М., склала цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи доцента, к.т.н. Волянської Я. Б. упроваджено у навчальний процес кафедри ЕОС та ІБ Навчально-наукового інституту автоматики та електротехніки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова у вигляді:

- інноваційної розробки, а саме спеціалізованого моделюючого комплексу (СМК), який є лабораторним обладнанням навчально-дослідницької лабораторії № 321 «Технічних засобів автоматизації систем контролю і керування транспортних засобів»;

- інноваційної розробки, а саме інтерактивного комп'ютерного комплексу (ІКК) термінального типу, який спроектовано і реалізовано на базі використання сучасних ресурсозберігаючих технологій;

- науково-методичного забезпечення ряду навчальних дисциплін.

До складу СМК, розробленого Волянською Я. Б., входить метрологічно-атестований навчально-дослідницький лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1» і спеціалізоване авторське програмне забезпечення. Останнє серед іншого містить запропоновані математичні моделі асинхронного двигуна спеціального призначення, а також методики синтезу регуляторів різних типів. Проведений комплекс експериментальних досліджень довів надійність і безвідмовність роботи СМК.

Реалізація проекту Інтерактивного комп'ютерного комплексу дозволила, завдяки використанню комплектів термінального доступу, створити додаткові повноцінні навчально-дослідницькі робочі місця з мінімальними витратами, надати адміністраторові широких можливостей щодо керування мережею з одного робочого місця.

Дисертаційні розробки Волянської Я. Б., які використовуються у навчальному процесі кафедри ЕОС та ІБ:

- пройшли метрологічну атестацію (похибка вимірів на перевищує $\pm 2\%$);
- призначені для вивчення і перевірки ефективності роботи регуляторів і систем керування рухом спеціальних морських апаратів в стаціонарних і динамічних режимах; виміру енергетичних і динамічних характеристик електроприводів постійного і змінного струму.

Ефект використання розробок Волянської Я. Б. полягає у:

- підвищенні продуктивності проведення навчальних занять у 2-3 рази за рахунок можливості виконання на одному СМК до 15 навчально-дослідницьких робіт;
- підвищенні якості та ефективності засвоєння матеріалу студентами, завдяки візуалізації навчального процесу, введення до нього елементів наукового пошуку.

Розроблене науково-методичне забезпечення дисциплін містить навчальну і робочу програми, курси лекцій, методичні матеріали до практичних, лабораторних, семінарських занять.

Зазначені вище результати дисертаційної роботи Волянської Я. Б. з 2007 р. використовуються у навчальному процесі Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю 141– «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізаціями «Електричні системи і комплекси транспортних засобів», «Морська робототехніка», «Експлуатація суднових автоматизованих систем» «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» при проведенні лабораторних робіт, практичних занять, при виконанні курсових проектів по дисциплінам «Програмне забезпечення проектування електромеханічних систем», «Системи контролю і керування транспортних засобів», «Керування морськими рухомими об'єктами», «Теорія електропривода», «Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів», «Основи наукових досліджень», а також при виконанні бакалаврських і магістерських робіт.

Голова комісії

д.т.н., професор кафедри ЕОС та ІБ ..

В. І. Локарев

Члени комісії:

к.т.н., доцент кафедри ЕОС та ІБ

В. М. Овсянников

завідувач лабораторіями
кафедри ЕОС та ІБ

В. М. Роздільський

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Ректор Національного
університету кораблебудування
ім. адм. Макарова

проф. С. С. Рижков

2017 р.

ДОВІДКА

Цим документом засвідчуємо, що доцент, канд. техн. наук, доцент кафедри електрообладнання суден та інформаційної безпеки Волянська Яна Богданівна приймала участь в якості виконавця у наступних держбюджетних науково-дослідних темах.

1. Комплексна НДР «Теоретичні основи створення й ефективного використання підводних роботизованих комплексів для дослідження та освоєння Азово-Чорноморського басейну», держреєстрація № 0105U001765 (науковий керівник – проф. Блінцов В. С.).

Розроблювала структури, алгоритму функціонування й комп'ютерної програми реалізації адаптивних регуляторів, які використовуються при створенні високоточних систем керування рушійним пристроєм підводного апарата, рекомендації щодо умов і області застосування синтезованих адаптивних регуляторів.

2. НДР № 1896 «Розробка теоретичних основ групового керування автономними підводними апаратами», держреєстрація № 0113U000243 (науковий керівник – проф. Блінцов В. С.).

Розроблювала спеціалізований моделюючий комплекс (СМК), який є лабораторним обладнанням навчально-дослідницької лабораторії № 20 «Теоретичні основи електропривода та силової перетворювальної техніки» (акт вводу в експлуатацію від 27.08.2014 р.). До складу СМК входить метрологічно-атестований навчально-дослідницький лабораторний пристрій «Стенд випробувальний СВ-1» і спеціалізоване програмне забезпечення.

3. НДР № 1935 «Розробка, супровід виготовлення та випробування дослідного зразка вантажного самохідного телекерованого підводного носія у комплекті з технічною документацією», держреєстрація № 0111U002314 (науковий керівник – проф. Блінцов В. С.).

Прийняла участь у синтезі законів та алгоритмів керування

баророзвантаженим асинхронним двигуном гвинтового рушійного пристрою самохідного підводного апарата.

4. НДР № 1996 «Розробка теоретичних основ та програмно-технічних засобів керування багатоцільовим морським безкіпажним комплексом», держреєстрація № 0115U000307 (науковий керівник – проф. Блінцов В. С.).

Розроблювала математичні моделі баророзвантаженого асинхронного двигуна і рушійного пристрою підводного апарата, а також методики синтезу регуляторів різних типів.

Начальник науково-
дослідної частини
НУК ім. адм. Макарова,
доцент, к.т.н.



С. С. Рижков

**ПАТ Суднобудівна компанія «Укррічфлот»
Філія «Херсонський суднобудівний-судноремонтний завод ім. Комінтерну»**

73000, Україна, м. Херсон,
Карантинний острів, 1,
Телефон: (+380552) 411600
Факс: (+380552) 411600
E-mail: kherson_shipyard@ukrrichflot.com.ua

73000, Ukraine, m. Kherson,
Karantynnyy ostriv, 1,
Tel.: (+380552) 411600
Fax: (+380552) 411600
E-mail: kherson_shipyard@ukrrichflot.com.ua

Вих. № 113
від «14» 09 2019 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Волянської Яни Богданівни
«Наукове обґрунтування і розробка автоматизованих систем керування
електрорушійними суден спеціального призначення»

Цим актом засвідчується, що у ПАТ СК «Укррічфлот» філії «Херсонський суднобудівний-судноремонтний завод ім. Комінтерну» впроваджені та використані результати дисертаційної роботи Волянської Я. Б. «Наукове обґрунтування і розробка автоматизованих систем керування електрорушійними суден спеціального призначення», які мають актуальність, містять суттєву практичну значущість при проектуванні суден спеціального призначення, а саме:

- методики розрахунку експлуатаційних та маневрових характеристик суден спеціального призначення, які використовуються на начальних стадіях проектування;

- методику ідентифікації параметрів математичної моделі судна, яка використовується для забезпечення режимів ефективної експлуатації судна при стабілізації курсу.

Результати дисертаційних досліджень Волянської Я. Б. мають наукову значимість, практичну цінність та спрямовані на зниження аварійності та підвищення ефективності роботи судових електромеханічних систем різного призначення. Робота представляє безумовний інтерес для підприємства.

Головний технолог
філії «Херсонський
суднобудівний-судноремонтний
завод ім. Комінтерну»



А. Л. Доценко



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Ген. директор ТОВ «Онiкс»

В. В. Вербицький

02756067

02 2019 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Волянської Яни Богданівни

«Наукове обґрунтування і розробка автоматизованих систем керування електрорушійними суден спеціального призначення»

Комісія підприємства склала цей акт у тому, що результати дисертаційного дослідження Волянської Я. Б. впроваджені у виробництво на ТОВ «Онiкс» у вигляді електромеханічної частини асинхронного двигуна спеціального призначення.

За участю Волянської Я. Б. підготовлено комплект технологічно-конструкторської документації.

На підставі запропонованих нових методів проведено комплекс лабораторно-експериментальних досліджень електромеханічної частини двигунів, що довели надійність і безвідмовність роботи створених експериментальних зразків. За результатами експериментальних досліджень виготовлено установчу партію електромеханічної частини двигунів, а приймально-здавальні випробування довели можливість її запуску у серійне виробництво.

З 2012 р. розробка Волянської Я. Б. виготовляється дрібносерійними партіями. За цей час претензій про відмову електромеханічної частини двигунів від замовників не надходило.

Розробка Волянської Я. Б. також використовується при серійному виробництві електродвигунів ОКА 180-4/56РКЛ. Орієнтовний річний економічний ефект складає близько 200 тис. грн.

Впровадження здійснено в рамках комплексної науково-дослідної роботи «Теоретичні основи створення й ефективного використання підводних роботизованих комплексів для дослідження та освоєння Азово-Чорноморського басейну» (номер державної реєстрації 0105U001765) у 2012 р.

Акт підготовлений для пред'явлення за місцем захисту дисертації.

Члени комісії:

заст. ген. директора

Н. І. Руденко

інженер-технолог

І. А. Барінова

майстер

А. В. Матутін

Вих. № 257

від «15» 07 2020р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Волянської Яни Богданівни

«Наукове обґрунтування і розробка автоматизованих систем керування електрорушійними суден спеціального призначення»

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційних досліджень Волянської Я. Б. використовуються у вигляді пропозицій та рекомендацій у діяльності підприємства ТОВ «СМАРТ-МЕРИТАЙМ ГРУПП» Миколаївська верф, зокрема – у проектуванні, побудові, експлуатації і моніторингу стану комбінованих пропульсивних комплексів суден з підрулюючими пристроями, з системами керування перетворювачами частоти, імпульсно-фазовими регуляторами напруги та асинхронними електродвигунами спеціального призначення.

Впровадження результатів дисертаційних досліджень Волянської Я. Б. дозволяються отримати вагомий економічний ефект у випадках :

- налагодження суднових систем керування різного рівня складності з позиції підвищення їх енергетичної ефективності;
- їх використання при проектуванні нових моделей пропульсивних комплексів;
- їх застосування при розробці експертних систем, що забезпечують аналіз процесів у судновій електроенергетиці.

Робота має виражену практичну спрямованість, представляє для підприємства безперечний інтерес.

Головний інженер
Миколаївська верф
«Smart Maritime Group»



І. В. Грубкін

NATIONAL UNIVERSITY
 "ODESSA MARITIME ACADEMY"
 INSTITUTE OF POSTGRADUATE EDUCATION
 "TRAINING & CERTIFYING CENTRE
 OF SEAFARERS"

16, Pastera str., Odessa, 65026, Ukraine
 tel/fax: 038 (048) 793-24-79
 E-mail: office@tccs.odessa.ua



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 "ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ"
 ІНСТИТУТ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ
 "ЦЕНТР ПІДГОТОВКИ ТА
 АТЕСТАЦІЇ ПЛАВСКЛАДУ"

Україна, 65026, Одеса, вул. Пастера, 16
 тел/факс: 038 (048) 793-24-79
 E-mail: office@tccs.odessa.ua

« 24 » 06 2020 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційних досліджень

Цим актом засвідчується, що у ІПО «ЦПАП» у навчальний процес курсів підвищення кваліфікації були впроваджені наступні результати дисертаційної роботи Волянської Яни Богданівни «Наукове обґрунтування і розробка автоматизованих систем керування електрорушійними суден спеціального призначення» у рамках розробленої системи підтримки прийняття рішень (СППР):

- методика обрання елементів пропульсивного комплексу (ПК) і елементів системи керування автономного плавального апарата подвійного призначення (АПА ПП) на основі методу «компромісу»;
- методика використання частково-інваріантних до вітро-хвильових збурень принципів стабілізації курсу АПА ПП;
- методика використання принципів модульності та мінімальної апаратної надмірності для визначення елементів ПК і автоматизованої системи керування АПА ПП у залежності від технологічного завдання.

Директор ІПО «ЦПАП»
 к.т.н., доцент



В. В. Пономаренко

Зав. кафедри
 Технічна експлуатація суден ІПО «ЦПАП»,
 к.т.н., доцент

В. А. Шевченко

Загальні положення

Метрологічна атестація нестандартного засобу вимірів стенда випробувального СВ-1 (далі стенда) здійснюється з метою встановлення придатності стенда до застосування й має задачі:

- визначення метрологічних характеристик стенда;
- встановлення кількісного значення метрологічних характеристик, що підлягають контролю при експлуатації, методів і засобів перевірки, міжповірного інтервалу.

Характеристики, що підлягають визначенню при атестації:

- частота обертання.

Операції атестації:

- перевіряється відповідність стенда вимогам нормативно-технічної документації;
- визначається придатність стенда до експлуатації.

Засоби атестації:

- частотомір електронно-лічильний ЧЗ-36, з/н 703172.

Умови атестації:

- атестація проводиться за атмосферних умов в лабораторії;
- напруга струму живлення 220В, частота 50Гц.

Вимоги безпеки:

1. До роботи на стенді допускаються особи, що пройшли інструктаж по техніці безпеки, вивчили пристрої і принцип роботи стенда.
2. Перед початком роботи необхідно переконається в надійності кріплення стенда до фундаменту.
3. Наявність сторонніх предметів на стенді не допускається.
4. Перед поданням напруги на стенд необхідно переконатися в наявності заземлення на усіх його блоках.

Підготовка до атестації:

1. Стенд повинен знаходитися в зібраному виді.
2. Джерела живлення стенда мають бути включені.

3. Програмне забезпечення має бути завантажено на ПЕОМ й перевірене в тестовому режимі.

4. При проведенні атестації повинні дотримуватися правила техніки безпеки при роботі на стенді.

Проведення атестації:

1. Зовнішній огляд:

– перевіряється правильність установки стенда, горизонтальність установки столу;

– перевіряється надійність монтажу машин для випробувань і навантаження;

– перевіряється комплектність стенда.

2. Випробування:

2.1 Перевіряється робота датчика частоти обертання при зміні частоти обертання машини для випробувань.

2.2 Перевіряється робота електронних ваг для визначення обертового моменту.

3. Методи випробувань для визначення характеристик точності:

3.1 Перевіряється збіжність вимірюваної частотоміром частоти обертання машини для випробувань із показниками, отриманими після обробки сигналів від датчика частоти обертання на ПЕОМ.

Обробка результатів. На підставі отриманих даних визначається величина розбіжності між чисельними значеннями заданих контрольних величин і показниками, що виводяться на дисплей ПЕОМ.

Оформлення результатів атестації.

1. При проведенні атестації ведеться протокол метрологічної атестації стенда згідно положення Б ДСТУ 3215-95.

Протокол складається в двох екземплярах, один з яких зберігається у відділі стандартизації і метрології, другої – на кафедрі ЕОСтаІБ.

2. При позитивних результатах метрологічної атестації стенда складається свідоцтво про метрологічну атестацію стенда згідно додатка В ДСТУ 3215-95.

Б.2 Протокол метрологічної атестації нестандартного засобу вимірів

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НІР та МД

проф. Є.І. Трушляков

_____ 2015 р.

**Протокол №1****метрологічної атестації нестандартного засобу вимірів**

1.	Загальні дані про атестацію	Нестандартний засіб вимірів стенд випробувальний СВ-1 Призначення: дослідження систем автоматичного управління електроприводами різного роду струму рушійно-стернових комплексів підводних апаратів.
2.	Метрологічні характеристики	Частота обертання
3.	Метод вимірів	Прямий
4.	Операції досліджень	1. Завдання контрольної частоти обертання машини навантаження з виведенням чисельних значень на дисплей ПЕОМ (таблиця. 1). 2. Обробка результатів (таблиця.2). 3. Аналіз результатів.

Таблиця Б.1 – Результати вимірів

Задана частота, об/хв	Показання еталонного приладу (частотоміра), об/хв	Чисельне значення частоти обертання, що виводиться на дисплей ПЕОМ, об/хв
1	2	3
100	100	101
200	201	200
300	302	301
400	402	400
500	500	502
600	600	601
700	700	703
800	802	804
900	901	903
1000	1004	1008
1100	1102	1098
1200	1199	1203
1300	1298	1300
1400	1405	1410
1500	1498	1499
1600	1600	1600
1700	1706	1710
1800	1806	1799
1900	1899	1900
2000	2000	2009

Таблиця Б.2 – Результати обробки

Задана частота, об/хв	Абсолютна похибка, об/хв	Відносна похибка, %
1	2	3
100	1	1,00
200	-1	0,50
300	-1	0,33
400	-2	0,50
500	2	0,40
600	1	0,17
700	3	0,43
800	2	0,25
900	2	0,22
1000	4	0,40
1100	-4	0,36
1200	4	0,33

Продовження таблиці Б.2

1300	2	0,15
1400	5	0,36
1500	1	0,07
1600	0	0,00
1700	4	0,23
1	2	3
1800	-7	0,39
1900	1	0,05
2000	9	0,45

Робочі характеристики електричної машини, що визначаються на випробувальному стенді:

– частота обертання в діапазоні від 100 до 2000 об/хв з максимальною відносною похибкою, що не перевищує задану $\pm 2\%$.

Нестандартний засіб вимірів стенд випробувальний СВ-1 для дослідження систем автоматичного управління електроприводами різного роду струму рушійно-кермових комплексів підводних апаратів придатний до експлуатації. Періодичність перевірки: один раз в два роки.

Б.3 Свідоцтво про метрологічну атестацію нестандартного засобу вимірів

Міністерство освіти і науки України

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

СВІДОЦТВО №1

про метрологічну атестацію нестандартного засобу вимірів

Нестандартний засіб вимірів стенд випробувальний СВ-1 для дослідження ефективності систем автоматичного управління електроприводами різного роду струму рушійно-стернових комплексів підводних апаратів.

Дата випуску **вересень 2013 р.**

Призначення засобу вимірів: **вимір швидкості обертання електричної машини.**

Основні метрологічні характеристики: **частота обертання 100 ÷ 2000 об/хв $\pm 2\%$.**

Умови експлуатації – **лабораторія.**

Результати атестації:

№ п/п	Найменування метрологічних характеристик	Значення метрологічних характеристик, що отримані	Оцінка точності (похибки) визначення метрологічних характеристик
1	2	3	4
1	Частота обертання, об/хв	100-8000	±2%

За результатами метрологічної атестації (протокол №1 від «01» липня 2013р.) засіб вимірів допускається до застосування в якості **робочого, клас 1**.

Чергову перевірку провести не пізніше, ніж у вересні 2016р.

Проректор з НІР та МД
проф., канд. техн. наук



Є.І. Трушляков

Головний метролог

В.В. Мацкевич

Ст. наук. співробітник
НДІ підводної техніки

Г.В. Бабкін

Чергову перевірку було проведено у вересні 2020 р.

Б.4 Методика проведення вимірів і повірки нестандартного засобу вимірів стенда випробувального СВ-1

Міністерство освіти і науки України

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

УЗГОДЖЕНО

Головний метролог

В.В. Мацкевич

« » 2015 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НІР та МД

проф. Є.І. Трушляков

« » 2015 р.



Методика проведення вимірів і повірки нестандартного засобу вимірів стенда випробувального СВ-1

Нестандартний засіб вимірів стенд випробувальний СВ-1 (далі стенд) призначений для дослідження ефективності систем автоматичного керування електроприводами різного роду струму рушійно-кермових комплексів підводних апаратів шляхом проведення натурних експериментів.

1. Порядок проведення атестації

Вимір частоти обертання

Для проведення виміру частоти обертання використовується машина для випробувань, машина навантаження, система сполучення силових і вимірювальних блоків з ПЕОМ, блок виміру частоти обертання, датчик частоти обертання, частотомір електронно-лічильний.

Після приведення системи в робочий стан на силовий блок машини для випробувань подається управляючий сигнал для встановлення необхідної частоти обертання.

Частота обертання встановлюється біля точок 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000 об/хв.

Через блок сполучення здійснюється подання сигналу з датчика частоти обертання на ПЕОМ і подальша його обробка.

Заміряється частота обертання машини для випробувань за допомогою датчика частоти обертання й частотоміра електронно-лічильного.

Дані, що отримані на частотомірі електронно-лічильному та дані, що отримані й оброблені за допомогою ПЕОМ, записуються в протокол вимірів.

Кожен вимір робиться впродовж часу необхідного для обробки сигналів на частотомірі електронно-лічильному при максимальній вибірці.

Після проведення вимірів в точках зазначених п.2.1.3 здійснюється обробка отриманих даних і результат заноситься в протокол випробувань. На підставі оброблених даних робиться висновок про достовірність показників вимірювальної системи стенда СВ-1.

Перелік засобів вимірів, необхідних для атестації нестандартного засобу вимірів стенда випробувального СВ-1:

1. Частотомір електронно-лічильний ЧЗ-36, ТУ ЕЯ2.721.043.

Б.5 Навчально-дослідний лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1». Керівництво по експлуатації

Міністерство освіти і науки України

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут автоматичної та електротехніки

Кафедра електрообладнання суден та інформаційної безпеки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор НУК ім. адм. Макарова

Проф. С.С. Рижков

2015 р.



**Навчально-дослідний лабораторний
засіб**

«Стенд випробувальний СВ-1»

Керівництво по експлуатації

Керівництво по експлуатації (КЕ) призначене для студентів, фахівців, науковців, які проводитимуть експериментальні дослідження систем автоматичного управління електроприводами будь-якого роду струму рушійно-кермових комплексів (РКК) підводних апаратів (ПА) за допомогою стенду випробувального СВ-1 (далі стенду).

До складу КЕ входять розділи з описами конструкції і принципів роботи стенду взагалі й окремих її блоків.

При необережній експлуатації стенда й при порушенні норм техніки безпеки, обслуговуючий персонал може потрапити під дію електричного струму.

Для забезпечення грамотної і безаварійної роботи стенда до його експлуатації допускаються особи, які пройшли інструктаж по техніці безпеки, ознайомилися із дійсною інструкцією, мають групу допуску по техніці безпеки не нижче, ніж 3.

1 Опис і робота

1.1 Опис і робота стенда

1.1.1 Призначення стенда

Стенд випробувальний СВ-1 призначений для досліджень систем автоматичного управління електроприводами будь-якого роду струму рушійно-кермових комплексів підводних апаратів.

Побудова систем автоматичного керування (САК) проводиться у прикладному пакеті Simulink середовища Matlab. Взаємодія САК та електропривода відбувається через спеціальні периферійні модулі й плату вводу-виводу.

Стенд дозволяє:

- проводити наукові дослідження, лабораторні роботи на натурній моделі із застосуванням системи управління електроприводами різного роду струму, що програмно змінюється й налаштовується;
- отримувати та експортувати дані, отримані під час експериментів;
- здійснювати оперативне втручання в систему управління для отримання необхідних характеристик об'єкту;
- повністю змінювати (замінювати) систему управління (вона виконується програмно в діалоговому вікні);
- при необхідності змінювати силову й електромеханічну частини стенда залежно від поставлених задач.

1.1.2 Технічні характеристики (таблиця Д.3).

Таблиця Б.3 – Основні технічні характеристики стенда

№ з/п	Найменування параметра	Значення
1	Напруга живлення, В	220 ± 10 %
2	Споживана потужність, Вт, не більш, ніж	3000
3	Температура довкілля, °С	25 ± 5
4	Вологість, %, не більш, ніж	75
5	Привід машини постійного струму	
	– двигун	П-12М, 0,44 кВт, 1500 об/хв
	– напруга живлення, В	0÷110 В, ШІМ
	– збудження	незалежне, 110 В
	– сполучення з ПЕОМ	RS232
6	Привід машини навантаження	
	– двигун	АОМ 24-4, 0,45 кВт, 1500 об/хв
	– тип гальмування	динамічне
	– напруга живлення, В	0÷110 В, ШІМ
7	Сполучення з ПЕОМ плата І/О	Advantech PCI1711L
8	Число входів плати І/О	
	– аналогових	16
	– цифрових	12
9	Вимір частоти обертання приводу постійного струму	0÷2000 об/хв
10	Частота опитування входів плати І/О	100 кГц
11	Завдання форми навантаження	
	– «сходінка»	задається програмно
	– «синусоїда»	задається програмно
	– «за законом користувача»	задається програмно
	– «випадковим чином»	задається програмно
12	Вимоги до ПЕОМ	

Продовження таблиці Б.3

	– операційна система	Windows XP SP3
	– прикладний пакет	Matlab R2007a (в повній конфігурації) й вище
	– процесор	1,5 ГГц
	– пам'ять	1 Гб
	– відео	32 Мб і більше
	– вільне місце на диску	5 Гб і більше
	– вільний слот для плати I/O	PCI
13	Силовий блок машини навантаження	
	– напруга живлення, В	70
	– формування рівня напруги	постійне, ШІМ, ступінчасто
	– діапазон регулювання, В	від 0 до 70
	– кількість сходинок	7 біт, 128
	– захист від КЗ	апаратна
14	Силовий блок машини для випробувань	
	– напруга живлення, В	70
	– формування рівня напруги	постійне, ШІМ, ступінчасто
	– діапазон регулювання, В	від -70 до 70
	– кількість сходинок	8 біт, 256
	– захист від КЗ	апаратна

1.1.3 Склад стенда

До складу стенда входять (таблиця Б.4).

Таблиця Б.4 – Склад стенда

№ з/п	Найменування	Кількість
	<i>Електромеханічний блок</i>	
1	Машина постійного струму П-12М, 0,44кВт, 1500об/хв	
2	Машина змінного струму АОМ 24-4, 0,45кВт, 1500 об/хв	

Продовження таблиці Б.4

	<i>Електронний блок</i>	
3	Плата вводу-виводу PCI-1711L-BE	
4	Кабель екранований із 68-контактними з'єднувачами SCSI-II, довжина 2 м, PCL-10168-2E	
5	Клемний адаптер для 68-контактного з'єднувача SCSI-II, ADAM-3968-AE	
6	Персональна ЕОМ	
7	Ваги електронні ВР-02 МСУ-0,2/0.5/1-2С	
8	Привід постійного струму 1 (зміна напруги машини для випробувань)	
9	Привід постійного струму 2 (зміна напруги машини навантаження)	
10	Енкодер	

1.1.4 Засоби виміру, інструменти, і прилади

Для перевірки нестандартного засобу вимірів «Стенд випробувальний СВ-1» використовується частотомір електронно-лічильний ЧЗ-36, ТУ ЕЯ2.721.043.

1.1.5 Упаковка

Упаковка стенда проводиться за узгодженням із замовником, але з дотриманням вимог п. 4.

1.2 Опис і робота складових стенда

1.2.1 Стенд складається з наступних блоків:

– електромеханічний блок, що включає електричні машини для випробувань і навантаження;

– силовий блок 1, призначений для живлення машини для випробувань. Може використовуватися джерело з регульованою частотою й напругою живлення для асинхронних або синхронних двигунів або джерело регульованої постійної напруги для машин постійного струму;

– силовий блок 2 містить джерело регульованої постійної напруги для живлення машини навантаження;

- вимірювальний блок з датчиками швидкості, кута положення, струму, напруги, температури;
- блок сполучення, призначений для зв'язку вимірювального блоку, силових блоків 1 і 2 з ПЕОМ;
- блок керування, що містить ПЕОМ.

1.2.2 Опис роботи вимірювача частоти обертання

Датчик частоти обертання представляє собою прозорий диск з нанесеними на нього рівномірно по колу 60 непрозорими смужками. Ширина смуг і відстань між ними однакове. Як датчик використовується енкодер – дві оптопари, геометрично рознесені на відстані не більше половини ширини непрозорої смуги диска, що обертається. Таке положення їх в просторі дозволяє визначати по фронтах сигналів напрям обертання машини для випробувань.

Обчислення числа оборотів здійснюється по формулі

$$n = 1/T,$$

де T – період між проходженням двох непрозорих смужок повз одну з оптопар.

Явне значення частоти обертання виходить завдяки геометричному перетворенню (60 непрозорих ділянок) на диску, що обертається.

Значення періоду обробляється й фільтрується в спеціальному блоці на мікроконтролері. Після обробки сигнал передається по паралельному інтерфейсу в плату вводу-виводу PCI-1711L.

1.2.4 Опис роботи вимірювача моменту на базі ваг.

Характеристика ваг.

Для виміру моменту обертання використовуються ваги настільні електромеханічні ВР-02 МСУ-0,2/0.5/1-2С, виготовлені відповідно до ТУ У 21374130.002-99 і ГОСТ 29329-92. Дані, отримані при вимірі вагами, передаються на ПЕОМ. Після перерахунку даних по наступній формулі визначається обертовий момент, на валу машини для випробувань:

$$M = m \cdot g \cdot l,$$

де M – момент на валу машини для випробувань;

m – маса, вказана на вагах;

g – прискорення вільного падіння $9,81 м/с^2$;

l – плече, через яке машина для випробувань впливає на платформу ваг.

Ваги мають наступні характеристики (таблиця Д.5).

Таблиця Б.5 – Технічні характеристики ваг

Найбільша межа зважування	3кг;
Найменша межа зважування	0,001кг;
Межі допустимої абсолютної помилки в час експлуатації	$\pm 0,003$ кг;
Напруга живлення	187...242 В;
Споживана потужність, не більше	50 ± 1 Гц;
Робоча температура довкілля	$25 \pm 15^\circ\text{C}$
Інтерфейс зв'язку с ПЕОМ	RS232.

Опис протоколу інтерфейсу зв'язку з ПЕОМ.

Формат обміну даних:

- 1 стартовий біт;
- 8 інформаційних біт;
- 1 біт контролю по паритету (по парності);
- 1 стоповий біт.

Швидкість обміну – 4800 бод.

Список команд, які передаються зовнішнім пристроєм (ПЕОМ) і їх формат представлені в таблиці Д.6.

Таблиця Б.6 – Список команд

Код команди	Назва команди	Інформація, що передається (приймається) вагами
01h	Тара	відсутня
02h	не використовується	-
03h	Запит ваги	$(M_1) \dots (M_6)(C_1) \dots (C_{12})$ передається 18 байт

Команди 01.03h використовують коди цифр: 0=00h, 1=01h...9=09h. Значення $M_1...M_6$ – маса, $C_1...C_{12}$ – не використовується. M_1 – молодший розряд. Передача розпочинається з молодшого розряду, наприклад, якщо зважена маса «1.234», тоді на зовнішній пристрій передача значення маси матиме наступну послідовність байтів : 04h, 03h, 02h, 01h.

Схема з'єднання роз'ємів.

DIN-7			DB-9	
TXD	1	↔	2	TXD
RXD	4	↔	3	RXD
GND	6	↔	5	GND

2. Використання за призначенням

2.1 Експлуатаційні обмеження

2.1.1 До експлуатації стенда допускаються особи, які уважно вивчили це Керівництво по експлуатації, пройшли інструктаж по техніці безпеки, мають допуск по електробезпеці не нижче, ніж 3.

2.1.2 У разі виконання робіт студентами або науковцями, що не мають відповідного допуску по електробезпеці, вони можуть виконуватися під особистим контролем особи з необхідним допуском.

2.1.3 Експлуатація стенда повинна проводитися при параметрах мережі живлення й довкілля вказаних в п.1.1.2.

2.2 Підготовка стенда до використання

2.2.1 Заходи безпеки при підготовці стенду до експлуатації.

При підготовці стенда до використання необхідно слідувати правилами електробезпеки при роботі з напругою до 1000В.

2.2.2 Об'єм і послідовність зовнішнього огляду стенда.

Перед використанням стенда необхідно провести його зовнішній огляд в наступній послідовності:

1) автоматичні вимикачі в ланцюзі живлення стенду мають бути в положенні «виключено»;

- 2) оглянути електричний монтаж комутаційних і розподільних пристроїв на відсутність обривів і коротких замикань;
- 3) оглянути сполучні кабелі і їх роз'єми на відсутність ушкоджень ізоляції оболонки і корпусів;
- 4) перевірити легкість обертання електричних машин;
- 5) перевірити наявність і надійність з'єднання заземляючого дроту на корпусах електричних машин, корпусі.

2.3 Експлуатація стенда

Для початку експлуатації стенда необхідно включити ПЕОМ, запустити пакет MATLAB (рис. Б.1).

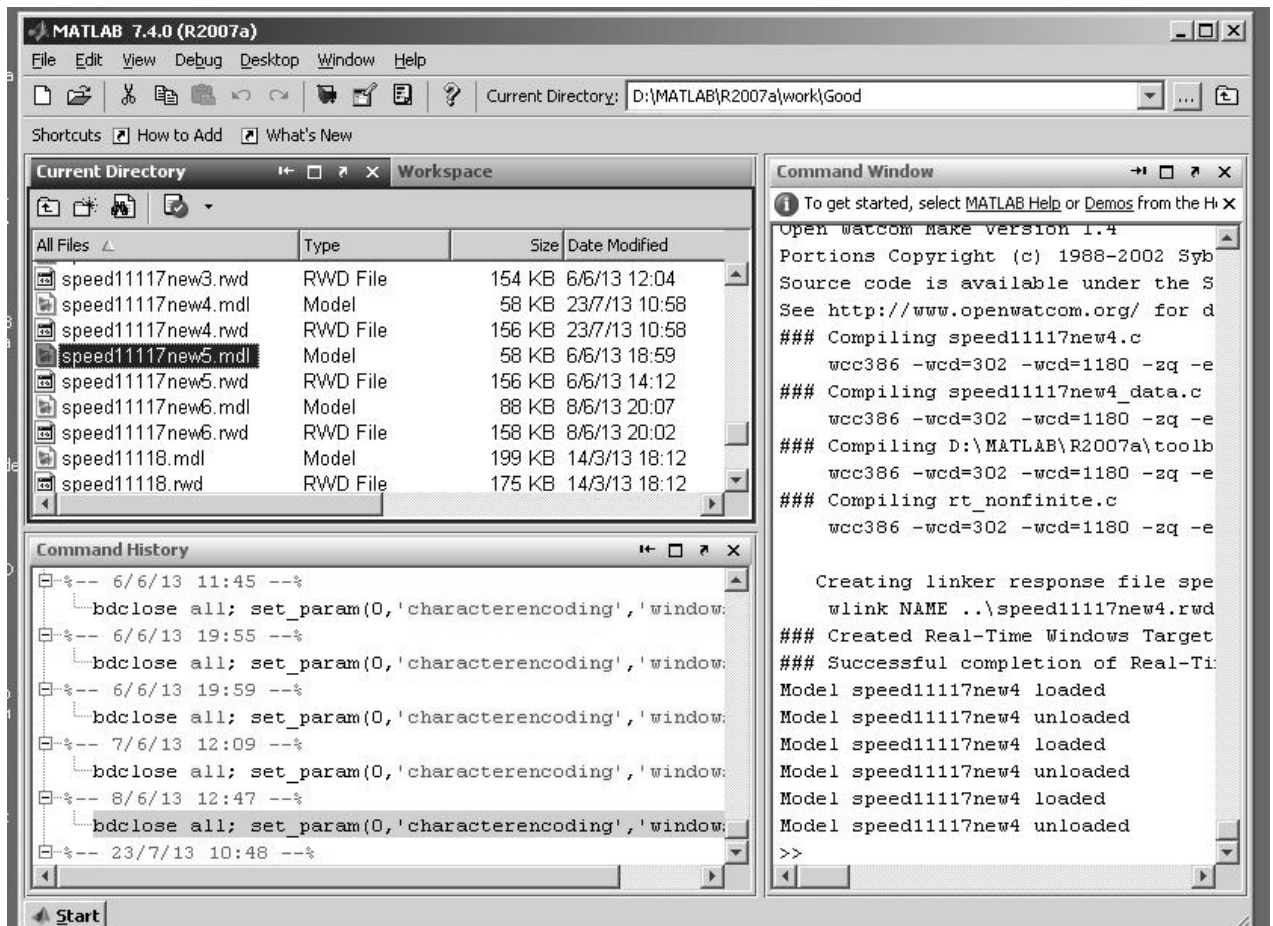


Рисунок Б.1 – Скриншот екрану із запуском пакетом MATLAB

З діалогового вікна MATLAB запустити програму, що виконується (рис. Б.2).

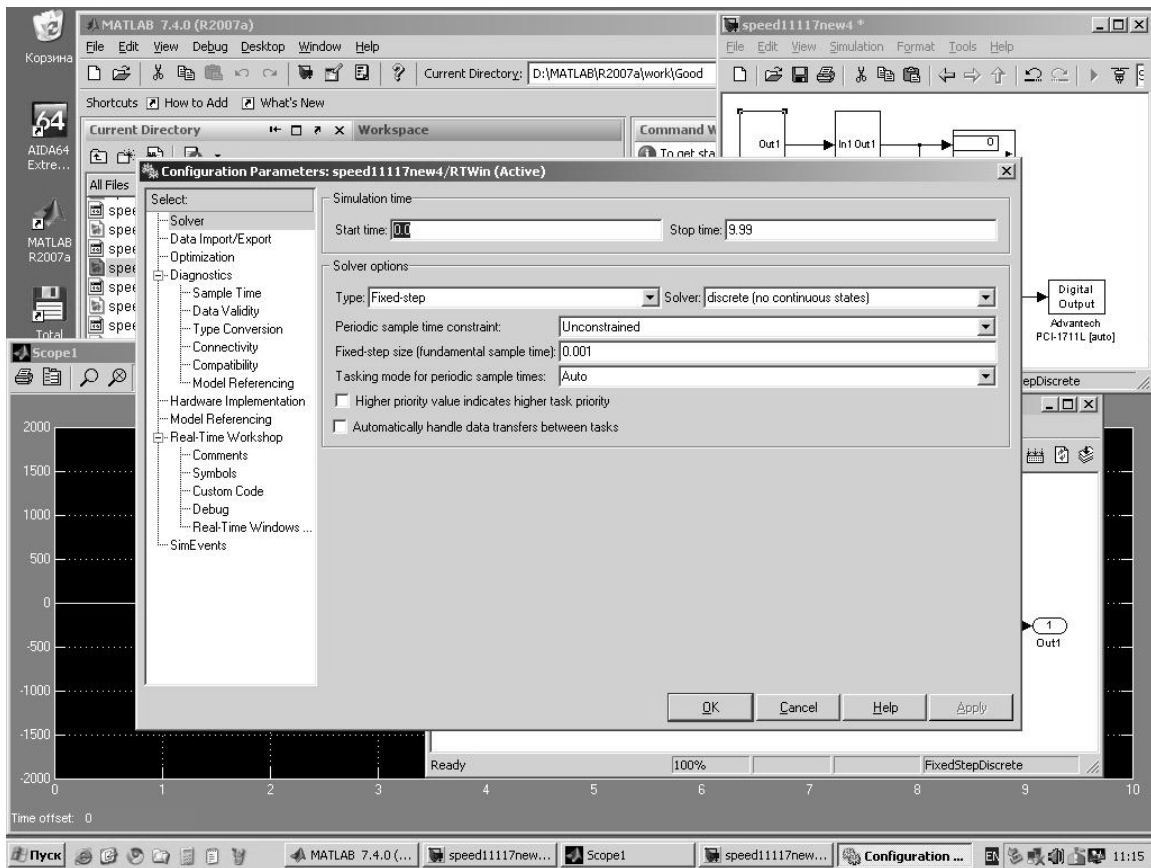


Рисунок Б.2 – Установка параметрів вирішувача

Встановити параметри вирішувача Solver в діалоговому вікні Configuration Parameters:

- Type – Fixed step;
- Solver - discrete;
- Periodic sample time constant - Unconstrained;
- Fixed step size - 0.01;
- Tasking mode for periodic sample times - Auto.

Вибрати пункт External у вкладці Simulation.

Набрати необхідну систему управління використовуючи блоки Digital Input Advantech PCI-1711L; Digital Output Advantech PCI-1711L для вводу-виводу інформації. При необхідності можна використати для обробки інформації як стандартні блоки, вибираючи їх з вкладки View→Simulink Library Browser, так і підпрограми, що самостійно розробляються.

Перед запуском програми необхідно запусити відладчик (рис. Б.3) і побудувати модель: вкладка Tools→Real-Time Workshop→Build Model.

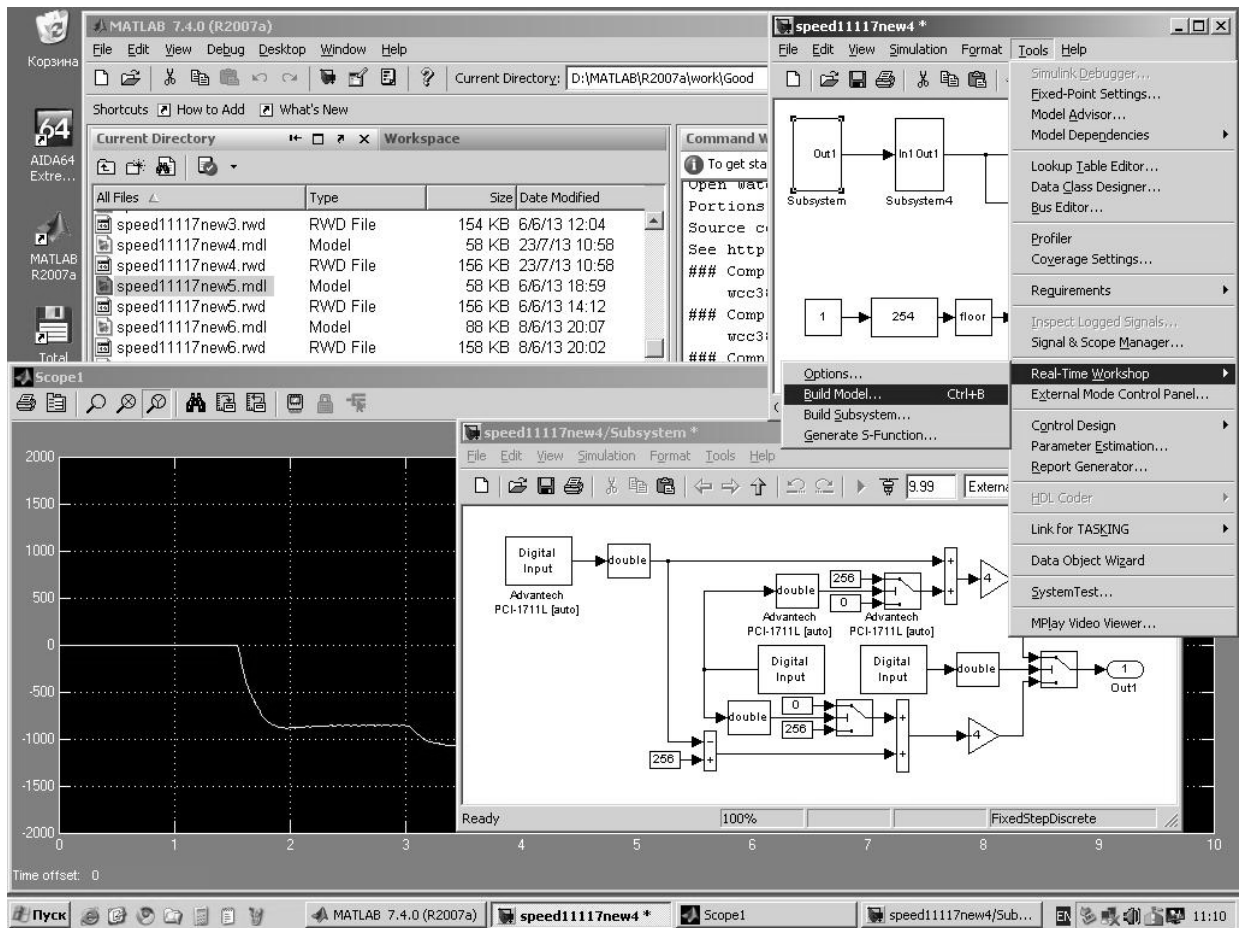


Рисунок Б.3 – Запуск відгадчика

Включаємо послідовно живлення ланцюга управління й силового ланцюга.

Після цього підключаємо модель до зовнішнього пристрою (плати вводу-виводу) кнопкою *Connect to target* і запускаємо модель. Відстежуємо стан зовнішнього пристрою по осцилографам *Scope* та індикаторам *Display*. Робимо при необхідності коригування й регулювання системи регуляторами *Slider Gain* і перемикачами *Manual Switch*.

По закінченні експерименту зберігаємо отримані дані для подальшої обробки. При необхідності робляться коригування системи, запускається відладчик, будується нова модель, і експеримент повторюється до отримання необхідних результатів.

На рис. Б.4 показано приклад з осцилограмою зміни швидкості обертання машини для випробувань залежно від довільного завдання значення напруги, що керує.

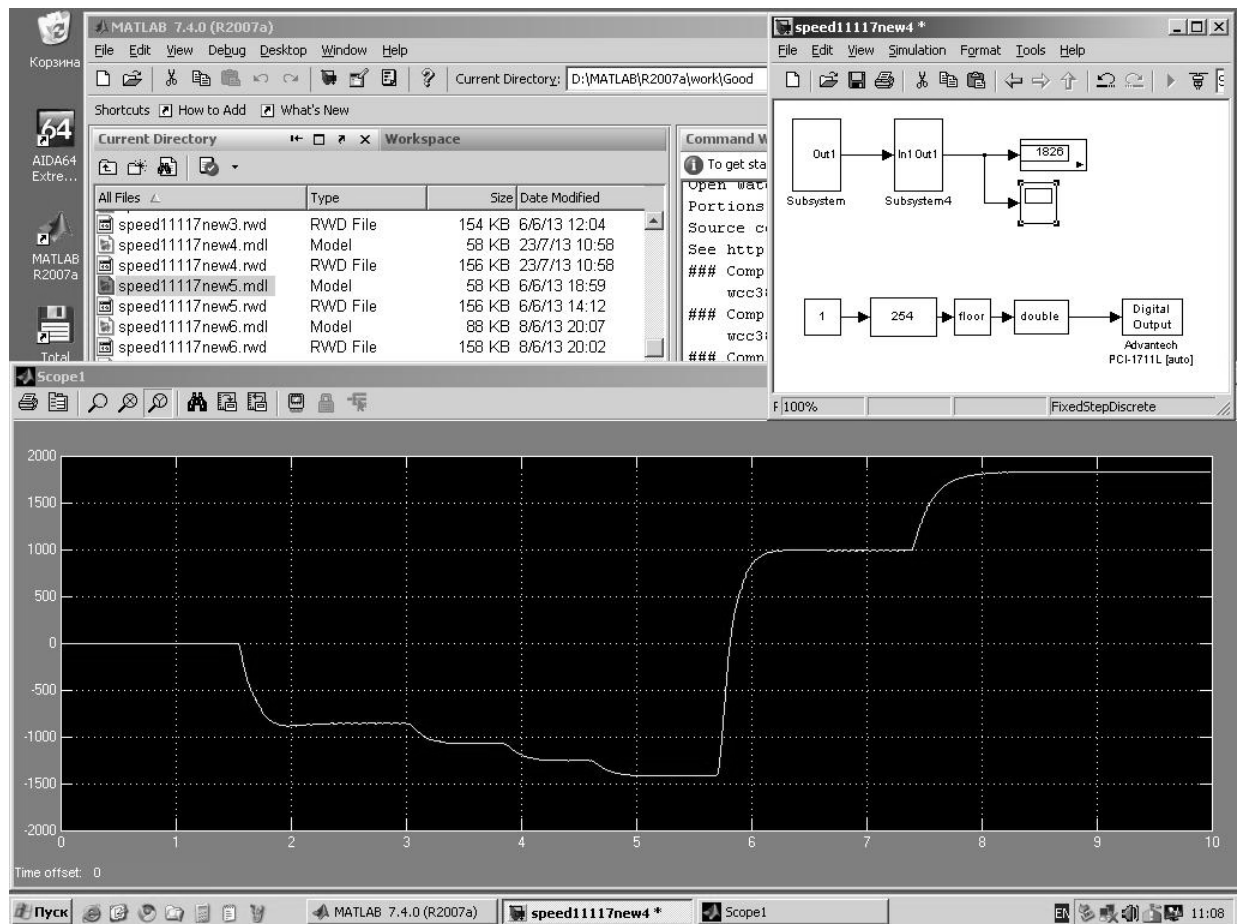


Рисунок Б.4 – Приклад з осцилограмою зміни швидкості обертання машини для випробувань

По закінченню експериментальних досліджень відключаємо спочатку силовий ланцюг, потім ланцюг управління, й останньою закриваємо програму та пакет MATLAB, вимикаємо живлення ПЕОМ.

Примітка: у разі збою програми або її «зависання», необхідно негайно відключити живлення силового ланцюга.

3. Технічне обслуговування й поточний ремонт

3.1 Технічне обслуговування стенда повинне проводитися кваліфікованими працівниками з групою допуску по електробезпеці не нижче, ніж 3.

3.2 Технічне обслуговування проводиться в наступні терміни:

– щодня, перед експлуатацією (протирається пил з електромеханічного блоку; перевіряється жорсткість закріплення конструкції на плиті й в цілому; цілісність ізоляції кабелів, відсутність візуальних обривів);

– щомісячно (об'єм по п.п. 3.2.1, перевіряється затягування елементів схем, затягування кріплення на силовому електромеханічному блоці);

– щороку (теж що в п.п. 3.2.1÷п.п. 3 2.2; перевіряється легкість обертання; щітковий вузол машини постійного струму; пробним пуском на різних режимах перевіряється відсутність сторонніх шумів).

3.3 Усі виявлені дефекти мають бути усунені до використання стенда за призначенням студентами або науковими співробітниками.

3.4 При проведенні ремонтних робіт робиться запис в паспорт з вказівкою об'єму робіт і заміненних (при необхідності) деталей.

4. Транспортування та зберігання

4.1 Транспортування стенда може здійснюватися усіма видами транспорту відповідно до правил, що діють на конкретному виді транспорту. При цьому має бути виключена можливість переміщення виробів при перевезенні усередині транспортних засобів.

4.2 Стенд слід зберігати не більше ніж в один ярус.

4.3 Стенд слід зберігати в опалюваних складських приміщеннях. Умови зберігання – 1(Л) ГОСТ 15150-69.

4.4 Стенд зберігати в упаковці, в сухому провітрюваному, захищеному від прямого попадання сонячних променів місці, при температурі не нижче – 5°C.

4.5 Не залишати стенд поблизу відкритого вогню та гарячих предметів.

4.6 Транспортування стенда без транспортної упаковки не допускається.

Б.6 Акт метрологічного опрацювання науково-дослідної роботи

1. Найменування теми розробка нестандартного засобу вимірів стенда для дослідження ефективності систем автоматичного управління електроприводами різного роду струму рушійно-кермових комплексів підводних апаратів.

2. Номер держбюджетної теми: №1896 «Розробка теоретичних основ групового керування автономними підводними апаратами» (ДР № 0113U000243).

3. Коротка характеристика методу(ів) вимірів: вимір частоти обертання здійснюється шляхом виміру періоду τ між імпульсами, сформованими оптопарою й диском з 60 оптичними прорізами, встановленим на валу електричної машини.

4. Характеристика способу обробки спостережень: перетворення періоду в частоту по формулі $f = \frac{1}{\tau}$ здійснюється в контролері, сформоване значення передається через плату вводу-виводу для подальшої обробки в ЕОМ.

ДОДАТОК В

Програмна реалізація синхронного фільтру «ковзне середнє»

```

;*****

```

```

Filter1

```

```

;пересылка во временные

```

```

    movffEXTERN1_H, AD_TEMP_H

```

```

    movffEXTERN1_L, AD_TEMP_L

```

```

;вычитание постоянной составляющей

```

```

    movlw    0

```

```

    subwfAD_TEMP_L

```

```

    movlw    80

```

```

    subwfb   AD_TEMP_H

```

```

bc    Filter1_no_negativ;Если получилось положительное,

```

```

;то перевод в доп. код не нужен

```

```

    negf AD_TEMP_L

```

```

    comf AD_TEMP_H

```

```

    clrf WREG

```

```

    addwfc   AD_TEMP_H

```

```

    bsf     FILTER1_NEG_FLAG

```

```

    bra    Filter1_sum

```

```

Filter1_no_negativ

```

```

    btfsc FILTER1_NEG_FLAG

```

```

    bsf     FILTER1_MUST_UPDATE_FLAG

```

```

    bcf     FILTER1_NEG_FLAG

```

```

Filter1_sum; Можно прибавлять

```

```

    movf AD_TEMP_L, W

```

```

    addwfsUMT1_2

```

```

    movf AD_TEMP_H, W

```

```

    addwfc   SUMT1_1

```

```
    clrf  WREG
    addwfc  SUMT1_0
;увеличение счетчика
    incf  COUNT_T1
;условие перехода через ноль
    btfsc  FILTER1_MUST_UPDATE_FLAG
    bra  Filter1_update  ;был переход
    movf  COUNT_T1, W
    xorlw 0ff
    bz  Filter1_update  ;или счетчик переполнился
    bra  Filter1_end
```

Filter1_update

```
    bcf  FILTER1_MUST_UPDATE_FLAG
    movffSUMT1_0, SUM1_0
    movffSUMT1_1, SUM1_1
    movffSUMT1_2, SUM1_2
    movffCOUNT_T1, COUNT_1
    movffCOUNT_T2, FAZ_SHIFT
    clrf  SUMT1_0
    clrf  SUMT1_1
    clrf  SUMT1_2
    clrf  COUNT_T1
    bsf  FILTER1OK_FLAG
```

Filter1_end

ДОДАТОК Д
Фотографії спеціалізованого моделюючого комплексу



Рисунок Д.1 – Спеціалізований моделюючий комплекс

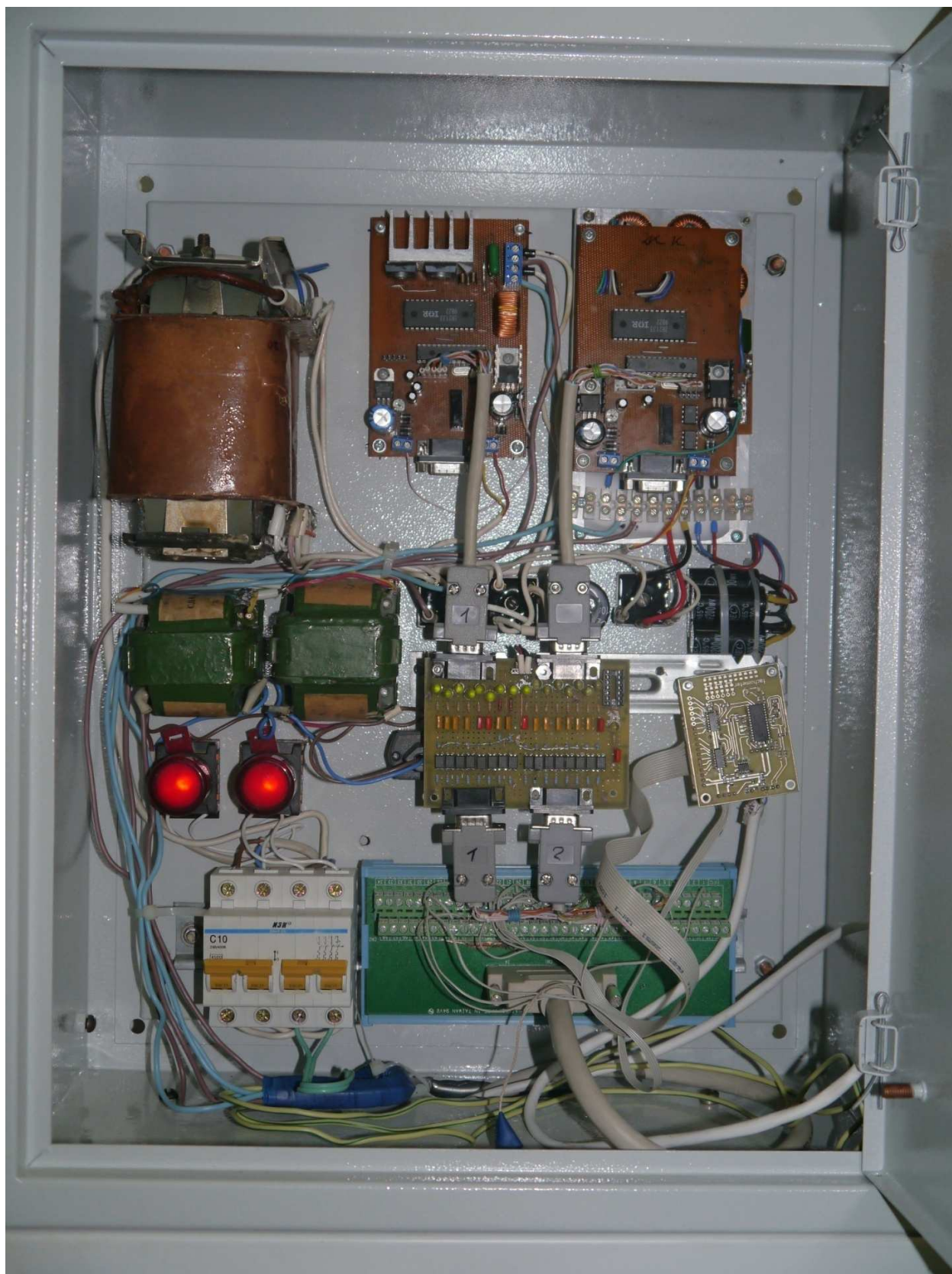


Рисунок Д.2 – Силовая часть специализованного моделирующего комплекса



Рисунок Д.3 – Спеціалізований моделюючий комплекс