

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ"
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шевченко Валерій Анатолійович

УДК 656.612.8

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ
ТА КОМПЛЕКСАМИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНА**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

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.

_____ В. А. Шевченко
(підпис)

Науковий консультант: Онищенко Олег Анатолійович,
доктор технічних наук, професор

Одеса – 2020

АНОТАЦІЯ

Шевченко В. А. Удосконалення управління технічними системами та комплексами при експлуатації судна. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту (271 – річковий та морський транспорт). – Національний університет "Одеська морська академія", м. Одеса, 2020.

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано і доведено нове концептуальне вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності експлуатації морських і річкових суден, яке здійснено за рахунок використання уперше запропонованих і удосконалення існуючих, вискоєфективних систем управління основними судновими технічними системами і комплексами (СТС і К). Проблема забезпечення вискоєфективного функціонування суден вирішується за умови гарантування їх безпечної експлуатації і створення відповідних організаційно-конструктивних умов при проектуванні, побудові та технічній експлуатації різноманітних СТС і К.

На основі аналізу сучасних інформаційних джерел, визначено, що у галузі технічної експлуатації морських і річкових суден, досліджень і проектування складних СТС і К сьогодення вимагає: а) необхідності удосконалення процесів передачі енергії з динамічними принципами управління і стабілізації параметрів суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) із мінімізацією невідворотних втрат під час її передачі, підвищення експлуатаційної гнучкості, сумісності, надійності і стійкості СЕЕС; б) створення нових, вдосконалення і раціоналізації існуючих систем управління різноманітних СТС і К. Показано, що: а) проблема вдосконалення процесів управління СТС і К, у тому числі СЕЕС, знаходиться у центрі уваги провідних розробників і фахівців з технічної експлуатації флоту; б) актуальними чинниками розвитку морського й річкового флоту України, затребуваністю практики у вирішенні ви-

значальних проблем підвищення ефективності комерційної експлуатації й ремонту СТС і К у цілому, є енергозбереження, економічність використання пального, надійність і безперебійність електропостачання, урахування міжнародних екологічних вимог.

З критичного аналізу існуючого стану розвитку СТС і К сформульована актуальна науково-технічна *проблема* – розробка і створення нових, та вдосконалення існуючих, систем управління технологічними процесами різноманітних складних СТС і К, підвищення ефективності експлуатації суден у цілому, *неможливі* без визначення і використання сучасних теоретичних методів синтезу методів ефективного управління технологічними процесами цих СТС і К. Показано, що *однією з актуальних цілей* розвитку СТС і К є обрання такого складу СЕЕС, одночасно з організацією її управління, так, щоб морські і річкові судна безперебійно отримували електроенергію необхідної якості, з максимально можливим ККД у широкому спектрі динамічних навантажень на електрогенеруючі агрегати, при змінюваних погодних умовах та з урахуванням обмежень, що стосуються гранично допустимих шкідливих викидів, які накладаються екологічними чинниками.

Встановлено, що розробка методів ефективного управління технологічними процесами на судні та експлуатацією морських транспортних засобів різного типу у цілому, обмежені істотним комплексом суперечливих, конфліктних, а у деяких випадках взаємовиключних, факторів. Визначені і сформульовані наступні невирішені *наукові протиріччя*.

1. *Необхідність*: а) розробки для різних типів суден ефективних методів пошуку раціональних конфігурацій різноманітних СТС і К і їх систем управління; б) знаходження компромісу між економічністю, надійністю (безперебійністю) енергопостачання і екологічністю СЕЕС, і *відсутність* вільного (ліцензійного) доступу до базових алгоритмів функціонування таких систем, до їх переналадження до конкретних умов експлуатації.

2. Існуючі можливості підвищення ефективності експлуатації СТС і К обмежені через *відсутність*: а) раціональних і апробованих методів матема-

тичного опису та верифікації процесів їх управління; б) методів і засобів швидкодіючого вимірювання параметрів електричної енергії, що відповідають сучасному рівню розвитку цифрової обчислювальної і керуючої техніки; в) оптимізації процесів різної фізичної природи у СЕЕС за низкою показників режимів їх роботи, при змінах навантаження і погодних умов.

Метою дослідження є підвищення ефективності управління та експлуатації різноманітними СТС і К складної конфігурації, яка вирішується на основі розробки і практичного використання запропонованих методів синтезу управління основними судновими технологічними процесами. Ця мета досягається вирішенням низки наукових завдань (структуризація систем управління СТС і К, визначення їх конфігурацій та інформаційних потоків; пошуку і розробки раціональних методів верифікації та математичного опису способів управління технологічними процесами СТС і К; розробки ефективних і вдосконалення існуючих методів вимірювання параметрів електроенергії; оптимізації процесів управління СТС і К з умови забезпечення мінімуму витрати палива і урахуванням погодних умов мореплавання, створення методів управління СТС і К при динамічних навантаженнях; синтезу алгоритмів управління СТС і К при нормальних і аварійних режимах роботи тощо).

Об'єктом дослідження є процеси функціонування складних СТС і К при нормальних і аварійних умовах експлуатації суден. *Предметом* дослідження є сукупність методів управління основними технологічними процесами СТС і К і експлуатацією суден у цілому. Наукова цінність дослідження визначена вирішенням основних наукових завдань.

У роботі поєднані теоретичні та експериментальні методи досліджень. Теоретичні методи розроблялися у випадках, коли доводилося стикатися з новими проблемами, що не досліджувалися раніше, або якщо застосування відомих нераціональне. При синтезі автоматизованих систем управління (АСУ) розглянутих СТС і К використані принципи взаємодії між різними рівнями у ієрархічній системі управління, які визначили, що: а) на вищому рівні приймаються такі рішення, що залишають нижчому рівню найбільшу сво-

боду у процесі їх реалізації (принцип відповідності міри впливу), та б) вищий рівень приймає нові рішення (правила та процедури) тільки за умови їх більшої ефективності, ніж відповідні рішення нижчого рівня (принцип субсидіарності). Експериментальні методи використані для верифікації отриманих за допомогою математичних моделей результатів. Експерименти проводилися на розробленій фізичній моделі – багатофункціональному тренажері суднових енергетичних установок зі змінною структурою й авторськими алгоритмами управління. Саме це дозволило максимально наблизити дослідження до вирішення практичних завдань, що підтверджено практикою (акти про використання результатів). Дані, отримані теоретично і експериментально, зіставлені і добре корелюються, що підтверджує достовірність отриманих нових наукових результатів, одержаних за допомогою запропонованих методів управління складними СТС і К.

У першому розділі проведено загальний аналіз стану і наведені існуючі проблеми розвитку процесів управління складними стс і к при їх експлуатації. визначені, засновані на прикладі управління СЕЕС, основні проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективності і тенденції розвитку СТС і К. Висунута *гіпотеза* дослідження – проблеми вдосконалення процесів управління складними СТС і К вирішуються визначенням конфігурації та структури їх систем управління, при умові застосування запропонованого методу синтезу програмно-апаратного забезпечення. Проведено аналіз відомих способів підвищення енергетичної ефективності СЕЕС, наведені рівні абстрагування опису АСУ і принципи оцінювання результуючої ефективності СТС і К.

У другому розділі наводяться використані методи аналізу і синтезу процесів управління СТС і К. Запропоновані принципи побудови алгоритмів управління, ергатичного і ергономічного аналізу СТС і К складної конфігурації та наведена методика оцінювання ефективності процесів експлуатації СТС і К, принципи побудови розподілених ієрархічних управління СТС і К складної конфігурації, визначена "технологія" наукового дослідження.

У третьому розділі запропоновано комплекс інформаційно-вимірювальної підтримки процесів управління СТС і К, необхідний для забезпечення їх ефективного функціонування. Зокрема, запропоновано принцип виміру і контролю навантаження СЕЕС із використанням імовірнісних характеристик процесів збурювань, наведені удосконалені методики виміру параметрів електроенергії СЕЕС, у тому числі – на основі мультипліційної обробки вимірюваних змінних (струму, напруги тощо).

Четвертий розділ присвячений синтезу процесів базового управління верхнього рівня складних ТС і К судна. Запропоновано семантику опису та методику декомпозиції завдань управління, наведено підхід до синтезу програми супервізора координатора програми управління СТС і К складної структури. Як приклад, наведена послідовність розв'язання завдання координованого управління СЕЕС при змінах навантаження. Синтезовані алгоритми оптимального управління СЕЕС за умови мінімуму витрати палива та з урахуванням метеорологічних умов плавання, у нормальних і аварійних режимах. Доведена ефективність запропонованих рішень.

У п'ятому розділі синтезуються процеси управління нижнього ієрархічного рівня розподіленої системи управління на прикладі автоматизованої СЕЕС. Наведені особливості синтезу програми супервізора локальних підсистем управління різних СТС і К. Запропоновані принципи управління процесами пуску та зупинки розподілених мікропроцесорних (МП) систем суднових ТС і К і доведена їх ефективність.

Шостий розділ присвячений побудові принципів і синтезу методик ефективного управління процесами синхронізації генераторних агрегатів (ГА), що знаходяться у складі розподілених МП-систем управління складних СТС і К. Поставлені завдання синхронізації, побудовані моделі процесів, баз даних і визначені конфігурації систем. На основі використання результатних функцій запропоновано опис моделей основних перетворювачів на базі використання принципу відносного руху об'єктів. На прикладі ГА, проведено аналіз функціонування елементів управління СТС і К, запропоновано вико-

ристання інтегральних критеріїв оптимізації і принципів дуального управління. Показані практичні способи управління синхронізацією ГА. Розв'язано задачу швидкодіючого управління частотою синхронізованих об'єктів на основі принципів припасування. Це дозволило визначити з упередженням часу моменти включення ГА при детермінованій і стохастичній постановці завдання синхронізації. Наведені результати експериментальних досліджень процесів синхронізації ГА і доведена ефективність запропонованого управління ГА.

У цьому розділі, на прикладі управління роботою суднового автостерна, наведені можливі варіанти побудови сучасних складних СТС і К, що використовують методи ідентифікації параметрів моделей, класичного (ПД, ПІД), релейного, нейроуправління і принципів частково інваріантного до збурень управління. Проведено аналіз структури та принципу дії систем управління курсом судна в умовах періодичних збурювань. Проаналізовані осцилограми кладок стерна вантажного судна, виділені їх основні характеристики (амплітуди та періоди основних гармонік кладок стерна). Створена маневрена модель гвинтового надвеликого контейнерного судна, оснащеного напівзбалансованим лопатевим стерном. Для верифікації моделі змодельовані дані порівнялись з даними натурних випробувань. Показано, що модельні коефіцієнти не можуть бути обчислені відомими методами і повинні бути скореговані відповідно до оброблених даних випробувань. Наведено методику верифікації коефіцієнтів зі спеціально розробленою цільовою функцією.

Приведена структура сучасної системи руху судна за необхідною траєкторією, проведено порівняльне моделювання цього процесу з використанням ПІД-регулятора, нейронного регулятора і нечіткого регулятора. Наведено порівняння різних режимів руху, визначена їх ефективність. Доведено, що нейро-регулятор руху має робастні властивості. При аналізі динаміки запропонованої системи управління показано, що якість стабілізації курсу судна не погіршується, що виключає необхідність додаткового переналаштування. Та-

кий результат досягнуто, також, за рахунок використання у алгоритмах управління запропонованої цільової функції.

З аналізу результатів математичного моделювання запропонованої частково-інваріантної до збурень системи стабілізації курсового куту морського судна визначено, що нова система ефективно придушує вітро-хвильові збурення на корпус судна. За допомогою розрахункового прикладу встановлено, що при умові компенсації результуючого збурення на судно, з використанням класичної системи стабілізації "за відхиленням" і ПД "технічно оптимального" регулятора автостернового, максимальне динамічне відхилення від курсу становить $\pm 2^\circ$. При аналогічних умовах навантажень, але з роботою запропонованої частково-інваріантної до збурень системи стабілізації курсу, максимальне динамічне відхилення, близько до $0,35^\circ$. З детального аналізу запропонованих систем визначено, що більш ефективна стабілізація курсу судна зумовлена підвищенням швидкодії автостернового – за рахунок упередженої дії на стерновий пристрій судна. Визначено, що за рахунок застосування запропонованих вдосконалень системи управління курсом можливо скорочення на 3-4 % витрат ходового часу, збільшення провізної здатності судна й зниження на 3-6 % витрати палива за рейс.

Практична цінність дослідження полягає у тому, що отримані у дисертації основні результати можуть використовуватися при визначенні загальної архітектури складних СТС і К, які гарантують їх високу експлуатаційну ефективність, у тому числі – при експлуатації суден у складних умовах плавання. Основні результати застосовуються під час навчання курсантів морських закладів вищої освіти, при підвищенні кваліфікації суднових механіків і електромеханіків. Основні **практичні результати** впроваджені у виробничу діяльність, у навчальний процес, а також пройшли апробацію на наукових заходах міжнародного і державного рівня, зокрема – семінарах Інституту електродинаміки НАН України "Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок".

У роботі науково доведена практична цінність запропонованих нових принципів і методів: а) вирішення завдань управління процесами пуску і зупинки дизель-генераторів у СЕЕС; б) вимірювання і контролю навантаження СЕЕС з використанням імовірнісних характеристик; в) синтезу алгоритмів верхнього рівня системи управління СЕЕС; г) управління "підгонкою" частоти та процесами автоматичної синхронізації суднових дизель-генераторів (у детермінованих і стохастичних умовах експлуатації). Визначені особливості експлуатації СТС і К з двигунами MAN B&W-ME, визначені вимоги до удосконалення тренажерів машинного відділення суден у системі освіти, навчання й наукових досліджень, наведені перспективи розвитку цих тренажерів у частині експлуатації СЕЕС і електроенергетичних установок.

У дисертації отримані **нові наукові результати**, де у рамках вирішення сформульованої науково-технічної проблеми, проведено аналіз існуючого стану і вперше вирішені завдання розвитку теорії та практики забезпечення ефективного управління і експлуатації складними СТС і К.

Ключові слова: ефективність, технічна експлуатація, якість, система управління, комплекс, математичне моделювання.

ANNOTATION

V. A. Shevchenko. An improvement of technical systems and complexes control during ship's operation. – 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 (271 – river and maritime transport). – National university "Odesa maritime academy", Odesa, 2020.

In dissertation work scientifically grounded and the new conceptual decision of scientific and technical pressing problem of marine and river ships operation efficiency improvement is well-proven, which is carried out with the use of the first time offered and improvement of existent basic ship technical systems and complexes (STSC) high-efficiency control systems. The problem of providing of high-

efficient ships operation is solving on condition of guaranteeing of it safe operation and creation of the proper terms at planning, construction, and technical operation of different STSC.

On the basis of analysis of modern information sources, was defined that in industry of marine and river ships technical operation, researches and planning of difficult STSC contemporary calls for: *a)* improvement of energy transmission with dynamic control principles processes and ships' electrical power systems (SEPS) parameters stabilization with energy transmission losses minimization, improvement of operational flexibility, compatibility, reliability and stability of SEPS; *b)* creation of new and improvement of existing various STSC control systems. It is demonstrated that: *a)* STSC, including SEPS, control processes improvement problem is the focus of attention of developers and experts in fleet technical operation; *b)* Ukrainian maritime and river fleet actual development factors, industry demand in efficiency improvement of STSC commercial operation and repair are energy saving, efficient fuel consumption, reliability and uninterrupted power supply, providing environmental requirements.

Basis on the critical analysis of STSC current state was articulated the relevant science and technology *problem* – development and creation of new and improvement of existing control systems of various complex STSC, ships' operation efficiency improvement generally, are *impossible* without determining and use of innovative theoretical synthesis methods of STSC technological processes effective control. It was demonstrated that *one of the relevant goals* is determining the SEPS composition with appropriate control providing uninterrupted power supply with required power quality and maximum efficiency in the wide range of generating sets dynamic load taking into account limitations connected to acceptable emissions (CO₂, NO_x, SO_x) according to the environment pollution prevention international requirements.

It is established that technological processes and maritime transport operation effective control methods development as a whole are limited by substantial

complex of controversial, conflict and, in some cases, mutually exclusive factors. The following unsolved *scientific contradictions* were determined and formulated.

1. *Necessity*: a) of the development the various STSC rational configurations searching methods and their control systems for different ships; b) of finding the compromise between economy, reliability (uninterruptability) of power supply and environmental friendliness of SEPS, and *absence* of free (licensed) access to the basic control algorithms of such systems and its reconfiguration to the definite operation conditions.

2. The efficiency improvement possibilities of the STSC operation are *limited* due to the *absence* of: a) rational and tested methods of mathematical description and control processes verification; b) methods and ways of fast acting electrical energy parameters measurement, which are corresponding to the current level of development of digital computing and control equipment; c) process optimization on the number of SEPS operation modes factors, during variable power plant load and environment conditions due to the *absence* of its implementation principles.

The goal of the research is efficiency improvement of various STSC control and operation with complex configuration, which is solving on the basis of the development and practical use of the offered control synthesis methods of the basic ship's technological processes. This goal is achieved by solving the number of scientific tasks: STSC control systems structuring, its configuration and information flows defining; searching and developing of rational verification and mathematical description methods of STSC technological processes control methods; development of new and improvement of existing methods of electrical power parameters measurement; STSC control processes optimization on the minimum fuel consumption taking into account navigation weather conditions; STSC control methods creation in dynamic load conditions; STSC control algorithms synthesis for normal and emergency operational modes etc.

Research object are complex STSC operation processes in normal and emergency ships' operation conditions. *Research subject* is combination of control

methods of the STSC technological processes and ships' operation as a whole. Research scientific value is defined by solving the basic scientific tasks.

Thesis combines theoretical, numerical and experimental research methods. Theoretical methods were developed in cases when there were new issues which haven't been studied earlier or application of existing methods was irrational. For STSC automated control synthesis were used principles of engagement between different control system hierarchy levels, which defined that: *a)* at the top level of control system hierarchy such decisions are taken that let most freedom in their implementation to the lower level (measure influence correspondence principle), and *b)* top level takes new decisions (rules and procedures) only through their higher effectiveness, than relevant low level decisions (subsidiarity principle). Experimental methods were used for the verification of received mathematical modeling results. Experiments were conducted on the developed physical model – ships' electrical power plant multifunctional simulator with variable structure and author's control algorithms. It was that focus that allowed maximally approach the research to practical tasks solving, what is confirmed by a number of practical implementation acts. Theoretical and experimental data was matched and well correlating, what confirms received new scientific results credibility which were received with the use of developed complex STSC control methods.

In the first chapter was conducted common analysis of the state and given existing development challenges of complex STSC control and operation. Main energy efficiency improvement problems and development trends were defined basing on SEPS control example. It was formed *research hypothesis* – complex STSC control development problems can be solved by defining its control system configuration and structure with the application of offered software and hardware synthesis method. An analysis of known SEPS energy efficiency improvement methods was conducted, automated control systems (ACS) abstraction description levels and STSC resultant effectiveness evaluation were given.

In the second chapter are given STSC control process analysis and synthesis methods used in research. Complex configuration STSC control algorithms and er-

gonomic analysis development principles are offered and STSC operation effectiveness evaluation method is given. Complex STSC distributed hierarchical system building principles is offered and research “technology” is defined.

In the third chapter is offered approach to ship’s monitoring systems and complexes information and measurement support, which provides its effective functioning. SEPS load measurement and control principle is offered with the use of probability characteristics and SEPS electrical energy parameters measurement method is given based on the multiplier measured variables (current, voltage etc.) processing.

Fourth chapter is dedicated to the synthesis of complex STSC top level control system. Description semantics and control tasks decomposition method is offered, complex STSC supervising control program synthesis approach is offered. As example, it is given the sequence of coordinated SEPS control in variable load condition. Ship’s electrical power plant control algorithms were synthesized on the minimum fuel consumption criterions taking into account sailing weather conditions in normal and emergency modes. Offered solutions effectiveness was proven.

In the fifth chapter distributed system low hierarchy level control is synthesized on the example of automated SEPS. Different STSC local control systems synthesis specifics are presented. STSC starting and stopping processes control principles using microprocessor systems were offered, its effectiveness was proven.

Chapter six is dedicated to the synthesis of generating sets (GS) synchronization effective control principles as a part of distributed microprocessor control systems of complex STSC. Synchronization tasks were set, process, database models were built and system configuration was defined. Basic convertors models description was offered with the use of result function on the basis of relative motion principle. On GS example the STSC control elements operation analysis was conducted, use of optimization integral criterions and dual control principles were offered. GS synchronization control practical tasks solving methods were shown.

Synchronizing GS frequency high-speed control task was solved basing on real time frequency adjustment principles. It allowed to define time predictive GS

circuit breaker closing moments in deterministic and stochastic synchronization task statement. GS synchronization processes research experiment results are given and effectiveness of offered control principles is proven.

In the seventh chapter, using the autopilot example, are given modern STSC building principles which are using models' parameters identification methods of classic PID (proportional integral derivative), relay, neural-fuzzy control and partly invariant to disturbances ship's course control. It was conducted structure and operation principle analysis of ship's course control system under periodic disturbance conditions. Cargo vessel rudder positions oscillograms were analyzed with its main features selection (amplitudes and periods of main rudder position harmonics in course stabilization mode). An ultra large container vessel with semi-balanced spade rudder was created. Model verification was conducted by comparing modelled data with trials data. It is shown that model coefficients cannot be calculated by known methods and have to be corrected as per trial data. The coefficients correction algorithm with a specifically developed objective function obtained as a result.

Ship's track control modern system structure is given, ship's movement on the track process modelling was carried out using PID, PD, neural and fuzzy regulators. Ship's track control operation with different regulators comparison is given, effectiveness of each regulator is defined. It's demonstrated that neural-fuzzy regulator has robust properties. The control system dynamics analysis shows that ship's course stabilization quality is not deteriorating even without additional adjustment. Such result is achieved, in addition, through offered objective function.

On the mathematical modelling analysis of the offered partly-invariant to disturbances ship's course stabilization system its defined that such system is effective and decreases influence of wind-wave disturbances on the ship's course. It is determined that compensation of the resultant disturbance using conventional course stabilization system and optimally adjusted PD controller provides course keeping with maximum dynamic deviation of $\pm 2^\circ$. At the same disturbances, but using offered partly-invariant course stabilization system, maximum dynamic de-

viation is $0,35^\circ$. From the detailed analysis of the offered systems was determined that more effective course stabilization is resulted from autopilot response speed improvement by proactive steering gear control. Its determined that using proposed course control system improvements can bring to decrease of navigation time on 3-4 %, and as follows, decrease in fuel consumption on 3-6 %.

Practical value of the research consists in possibility of the use the thesis results in complex STSC architecture definition, which guarantees its high operational effectiveness, including ships' operation in difficult conditions. Main thesis results are used in educational process of maritime institutions and in refresher and updating courses for marine engineers and electro-technical officers. Main **practical results** are implemented in production activities, educational process and were validated at state and international scientific events, particularly – at the seminars of Institute of electrodynamics of National Academy of Science “Optimal control and specific plants electrical drives operation”.

It is scientifically proven in the thesis the practical value of the offered new principles and methods: *a)* diesel-generator's start and stop process tasks solving in SEPS control systems; *b)* SEPS load measurement and control using probability characteristics; *c)* SEPS control system top level control algorithms synthesis; *d)* generator frequency control adjustment and ship's diesel-generators automatic synchronization process control (in deterministic and stochastic operation conditions). STSC with MAN B&W-ME engines operation specifics were determined, engine room simulators development requirements in educational, training and research system were defined, such simulators development prospects in SEPS operation part were offered.

There were received **new scientific results** in the thesis, where in the frame of solving the stated scientific-technical problem was conducted an analysis of the current state and for the first time where solved theoretical and practical tasks of providing of the STSC effective control and operation.

Keywords: effectiveness, technical operation, quality, control system, complex, mathematical modelling.

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. **Шевченко В. А.** Верификация функциональных алгоритмов системы управления многоагрегатной судовой электрической станцией / **В. А. Шевченко** // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – Вип. 21. – С. 70-76.

2. Захарченко В. Н. Решение задач управления судовой электроэнергетической установкой при изменении нагрузки / В. Н. Захарченко, **В. А. Шевченко** // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – Вип. 36. – С. 74-82.

3. **Шевченко В. А.** Анализ отказов и математическое моделирование ВРШ судов с системами динамического позиционирования / **В. А. Шевченко**, А. Д. Пипченко, О. А. Коваленко // Судовождение: сб. научн. трудов. – 2015. – Вип. 25. – С. 162-171.

4. **Шевченко В. А.** Проблема автоматизации оптимального маневрирования судна и пути ее решения / **В. А. Шевченко** // Проблемы техники: Науково-виробничий журнал. – 2015. – № 1. – С. 120-127.

5. **Шевченко В. А.** Исследование процесса перехода судна на заданный курс при различных законах управления / **В. А. Шевченко** // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: наук. журнал. – 2015. – Вип. 1(12). – С. 92-97.

6. **Шевченко В. А.** Анализ работы системы управления курсом судна в условиях периодических возмущений / **В. А. Шевченко** // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. – 2015. – Вип. 1(43). – С. 72-76.

7. Пипченко А. Д. Уточнение математической модели ходкости контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний / А. Д. Пипченко,

С. В. Копанский, **В. А. Шевченко** // Судноводіння: Зб. наук. праць. – 2017. – Вип. 27. – С. 169-176.

8. Пипченко А. Д. Математическое моделирование динамики контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний / А. Д. Пипченко, С. В. Копанский, **В. А. Шевченко** // Судноводіння: Зб. наук. праць. – 2018. – Вип. 28. – С. 141-151.

9. 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 та бізнес-процесів: наук. журн. – 2018. – № 2. – С. 57-63.

10. **Шевченко В. А.** Алгоритм быстрой оценки параметров судовых электроэнергетических систем / **В. А. Шевченко** // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2018. – № 3(244). – С. 136-141.

11. **Шевченко В. А.** Синтез алгоритмов управления вало- и дизель-генераторными установками / **В. А. Шевченко** // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: наук. журнал. – 2018. – Вип. 2(19). – С. 103-111.

12. **Шевченко В. А.** Способ решения задач управления процессом пуска и остановки дизель-генератора в системах управления судовыми электростанциями / **В. А. Шевченко** // Наукові праці: науково-методичний журнал. Серія "Комп'ютерні технології". – 2018. – Вип. 305. – Т. 317. – Видав. ЧДУ ім. П. Могили. – С. 23-29.

13. **Шевченко В. А.** Оптимизация управления электростанцией из условия минимума расхода топлива и с учетом метеоусловий / **В. А. Шевченко** // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки". – 2018. – № 4. – С. 46-55.

14. **Шевченко В. А.** Методы измерения и контроля нагрузки электростанции с использованием вероятностных характеристик / **В. А. Шевченко** // Системные технологии. Регион. сб. науч. тр. – 2018. – Вип. 5(118). – С. 184-195.

15. **Шевченко В. А.** Метод и особенности синтеза алгоритмов верхнего уровня системы управления судовой электростанцией / **В. А. Шевченко** //

Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2018. – № 6(247). – С. 165-174.

16. **Шевченко В. А.** Решение задачи оптимального управления подгонкой частоты дизель-генераторов в судовых электроэнергетических установках / **В. А. Шевченко** // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). – 2018. – № 2(10). – С. 88-92.

17. **Шевченко В. А.** Оптимизация процесса автоматической синхронизации судовых дизель-генераторов при детерминированной постановке задачи / **В. А. Шевченко** // Автоматизація технологічних та бізнес-процесів: наук. журн. – 2018. – № 4. – С. 43-52.

18. Budashko V., **Shevchenko V.** Synthesis of the Management Strategy of the Ship Power Plant for the Combined Propulsion Complex. *IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, 2018, pp. 106-109. (**Scopus**)

19. Pipchenko A. D., **Shevchenko V. A.** Vessel heading robust automatic controller for varying conditions. *Marine Intellectual Technologies*, 2018, Issue 4(42), V. 4, pp. 208-214. (**Web of science**)

20. Pipchenko O., Tsymbal M., **Shevchenko V.** Recommendations for Training of Crews Working on Diesel-Electric Vessels Equipped with Azimuth Thrusters. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2018, Vol. 12, № 3, pp. 567-571. (**Web of science**).

21. Volyanskaya Yana, Volyanskiy Serhey, Onishchenko Oleh, **Shevchenko Valerii.** Ship's course stabilization accuracy improvement by implementing dual-loop control system. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, 2019. Vol. 22, Issue № 2, pp. 94-100. MBNA Publishing House Constanta. DOI: 10.21279/1454-864X-19-I2-011.

22. Пипченко А. Н. Эксплуатация и ремонт одно- и двухтопливных двигателей производства *Wartsila* в энергетических установках морских транспортных средств: Монография / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко,

В. А. Шевченко, И. Н. Табулинский. – Одесса: ТЭС, 2018. – 361 с. ISBN 978-617-7711-02-4.

23. Шевченко В. А. Эксплуатация судовых технических комплексов с двигателями MAN B&W-ME: Монография / **В. А. Шевченко**: под ред. проф. О. А. Онищенко. – Одесса: ТЭС, 2019. – 400 с. ISBN 978-617-7711-21-5.

24. Volyanskaya Y. B., Volyanskiy S. M., Onishchenko O. A., **Shevchenko V. A.**, Trudnev S. Yu. Research of possibilities to increase the exactness of ship stabilizing on a course. *Marine Intellectual Technologies*, 2019, Issue 3(45), V. 3, pp. 174-181. (**Web of science**).

25. Будашко В. Вдосконалення стратегії управління багатомасовою електромеханічною системою / В. Будашко, **В. Шевченко** // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. – 2019. – V. 9 (49), pp. 38-43.

26. Budashko V. Improvement of the operation for electromechanical system under non-permanent loading / V. Budashko, I. Hvozdeva, O. Onishchenko, **V. Shevchenko**, R. Kudelkin // *15th International Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Slavske, 25-29 Feb. 2020, pp. 35-39, IEEE. <https://easychair.org/cfp/tcset-2020> (**Scopus**).

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. **Shevchenko V.** Requirements for further improvement of engine room simulators in the educational, training and research system. *Proceedings of the 13th International Conference on Engine Room Simulators, Odessa, NU "OMA", September 20-21, 2017*, pp. 102-108.

28. Будашко В. В. Ідентифікаційне маркування деградаційних ефектів на лінії гребних гвинтів / В. В. Будашко, **В. А. Шевченко**, Д. А. Агапцев // Матер. IX Міжн. наук.-практ. конф. "Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування", 13-14 вересня 2018 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. – С. 112-117.

29. **Шевченко В. А.** Перспективы развития тренажеров машинного отделения при подготовке судовых инженеров в части эксплуатации судовых электроэнергетических установок // Матер. наук.-метод. конф. "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 5-6 грудня 2018 р. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 27-32.

30. Пипченко А. Н. Эксплуатация, обслуживание и ремонт двигателей MAN B&W-ME / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, **В. А. Шевченко**. – Одесса: ТЭС, 2014. – 325 с. ISBN 978-617-7054-76-3.

31. Пономаренко В. В. Эксплуатация судового высоковольтного электрооборудования / В. В. Пономаренко, **В. А. Шевченко**: под ред. А. Н. Пипченко. – Одесса: ТЭС, 2014. – 283 с. ISBN 978-617-7054-31-2.

32. Пипченко А. Н. Судовые автоматизированные механические установки / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, **В. А. Шевченко**. – Одесса: ТЭС, 2015. – 366 с. ISBN 978-617-7337-10-1.

33. Пипченко А. Н. Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, Ю. И. Теплов, **В. А. Шевченко**. – Одесса: ТЭС, 2016. – 480 с. ISBN 978-966-2389-50-0.

34. Пипченко А. Н. Техническая эксплуатация одно- и двухтопливных двигателей *Wartsila-Sulzer* / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, **В. А. Шевченко**, И. Н. Табулинский. – Одесса: ТЭС, 2017. – 338 с. ISBN 978-617-7337-52-1.

35. Пономаренко В. В. Судовое высоковольтное оборудование / В. В. Пономаренко, **В. А. Шевченко**: под ред. А. Н. Пипченко. – Одесса: ТЭС, 2017. – 300 с. ISBN 978-617-7337-55-2.

36. Ya. Volyanskaya, S. Volyanskiy, O. Onishchenko, **V. Shevchenko**. Reserch of possibilities of increase of exactness of stabilizing of ship on a course /

SEA – CONF 2019, 5th International Conference. May 17-18, 2019, Constanta. “Mircea cel batran” Naval Academy. <https://www.anmb.ro/ro/conferinte/sea-conf/arhiva/program%20sea-conf%202019.pdf>.

37. **Шевченко В. А.** Підготовка фахівців з експлуатації високовольтного обладнання з використанням розподільчого пристрою NXAIR фірми Siemens / **В. А. Шевченко**, С. Ф. Самонов, В. О. Дубовик // IX Міжн. наук.-техн. конф. "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика" (SEEEA-2019). 5-6 грудня 2019 р. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 22-24.

38. **Шевченко В. А.** Проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективності і тенденції розвитку складних суднових технічних систем і комплексів / **В. А. Шевченко**, О. А. Онищенко // IV Міжн. наук.-практ. конф. "Perspectives of world science and education", 25-27 грудня 2019 року, Осака, Японія, CPN Publishing Group. – С. 86-96.

39. Hvozdeva I. Problems of improving the diagnostic systems of marine diesel generator sets / I. Hvozdeva, V. Budashko, V. Myrhorod, **V. Shevchenko** // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 25-29 Feb., 2020, pp. 350-354, IEEE. <https://easychair.org/cfp/tcset-2020> (**Scopus**).

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

1. Захарченко В. Н. Решение задач управления судовой электроэнергетической установкой при изменении нагрузки / В. Н. Захарченко, **В. А. Шевченко** // Судовые энергетические установки: науч.–техн. сб. – 2015. – Вип. 36. – С. 74-82, [2]:

– загальна постановка завдання та побудова принципу управління електроенергетичною установкою судна.

2. **Шевченко В. А.** Анализ отказов и математическое моделирование ВРШ судов с системами динамического позиционирования / **В. А. Шевченко**, А. Д. Пипченко, О. А. Коваленко // Судовождение: сб. научн. трудов. – 2015. – Вип. 25. – С. 162-171, [3]:

– постановка завдання і розробка математичної моделі гвинта регульованого кроку.

3. Пипченко А. Д. Уточнение математической модели ходкости контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний / А. Д. Пипченко, С. В. Копанский, **В. А. Шевченко** // Судноводіння: Зб. наук. праць. – 2017. – Вип. 27. – С. 169-176, [7]:

– проведення експериментів і верифікація математичної моделі судна.

4. Пипченко А. Д. Математическое моделирование динамики контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний / А. Д. Пипченко, С. В. Копанский, **В. А. Шевченко** // Судноводіння: Зб. наук. праць. – 2018. – Вип. 28. – С. 141-151, [8]:

– розробка математичної моделі судна, її уточнення, аналіз результатів.

5. 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 та бізнес-процесів: наук. журн. – 2018. – № 2. – С. 57-63, [9]:

– методика приведення навантаження до куту повороту стерна судна у математичній моделі системи управління.

6. V. Budashko, **V. Shevchenko**. Synthesis of the Management Strategy of the Ship Power Plant for the Combined Propulsion Complex. *IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. 2018, pp. 106-109. (**Scopus**), [18]:

– запропоновано принцип побудови алгоритмів управління судновою енергетичною установкою, що функціонує у складному пропульсивному комплексі.

7. Pipchenko A. D., **Shevchenko V. A.** Vessel heading robust automatic controller for varying conditions. *Marine Intellectual Technologies*. 2018, Issue 4(42), V. 4, pp. 208-214. (**Web of science**), [19]:

– постановка завдання, пропонування робастного алгоритму управління, аналіз результатів.

8. Pipchenko O., Tsymbal M., Shevchenko V. Recommendations for Training of Crews Working on Diesel-Electric Vessels Equipped with Azimuth Thrusters. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2018, Vol. 12, № 3, pp. 567-571. (**Web of science**), [20]:

– узагальнення рекомендацій, визначення перспективних напрямків досліджень дизель-електричних суден, обладнаних азимутними двигунами.

9. Volyanskaya Yana, Volyanskiy Serhey, Onishchenko Oleh, **Shevchenko Valerii**. Ship's course stabilization accuracy improvement by implementing dual-loop control system. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, 2019. Vol. 22, Issue № 2, pp. 94-100. MBNA Publishing House Constanta. DOI: 10.21279/1454-864X-19-12-011, [21]:

– розробка і уточнення математичної моделі, аналіз результатів.

10. Пипченко А. Н. Эксплуатация и ремонт одно- и двухтопливных двигателей производства *Wartsila* в энергетических установках морских транспортных средств: Монография / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, В. А. **Шевченко**, И. Н. Табулинский. – Одесса: ТЭС, 2018. – 361 с., [22]:

– розділ, присвячений експлуатації судових енергетичних установок.

11. Volyanskaya Y. B., Volyanskiy S. M., Onishchenko O. A., **Shevchenko V. A.**, Trudnev S. Yu. Research of possibilities to increase the exactness of ship stabilizing on a course. *Marine Intellectual Technologies*, 2019, Issue 3(45), V. 3, pp. 174-181, [24]:

– уточнення математичної моделі, аналіз результатів, висновки.

12. Бодашко В. Вдосконалення стратегії управління багатомасовою електромеханічною системою / В. Бодашко, **В. Шевченко** // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. – 2019. – V. 9 (49), pp. 38-43, [25]:

– оцінювання характеристик і вибір параметрів, що забезпечують задану якість функціонування складних багатомасових систем.

13. Budashko V. Improvement of the operation for electromechanical system under non-permanent loading / V. Budashko, I. Hvozdeva, O. Onishchenko, **V. Shevchenko**, R. Kudelkin // 15th International Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 25-29 Feb. 2020, pp. 35-39, IEEE. <https://easychair.org/cfp/tcset-2020> (**Scopus**), [26]:

– *методика урахування змінювання навантаження, висновки.*

14. Будашко В. В. Ідентифікаційне маркування деградаційних ефектів на лінії гребних гвинтів / В. В. Будашко, **В. А. Шевченко**, Д. А. Агапцев // Матер. 9-ї Міжн. наук.-практ. конф. "Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування", 13-14 вересня 2018 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. – С. 112-117, [28]:

– *розробка математичної моделі гребного гвинта, аналіз результатів.*

15. Пипченко А. Н. Эксплуатация, обслуживание и ремонт двигателей MAN B&W-ME / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, **В. А. Шевченко**. – Одесса: ТЭС, 2014. – 325 с., [30]:

– *розділ, присвячений визначенню проблем експлуатації і удосконаленню управління судновими двигунами.*

16. Пономаренко В. В. Эксплуатация судового высоковольтного электрооборудования / В. В. Пономаренко, **В. А. Шевченко**: под ред. А. Н. Пипченко. – Одесса: ТЭС, 2014. – 283 с., [31]:

– *розділ, присвячений розробці рекомендацій щодо підвищення ефективності експлуатації і управління судновим електрообладнанням.*

17. Пипченко А. Н. Судовые автоматизированные механические установки / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, **В. А. Шевченко**. – Одесса: ТЭС, 2015. – 366 с., [32]:

– *розділ, присвячений аналізу принципів функціонування складних автоматизованих судових механічних систем і комплексів.*

18. Пипченко А. Н. Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, Ю. И. Теплов, **В. А. Шевченко**. – Одесса: ТЭС, 2016. – 480 с., [33]:

– розділ, присвячений аналізу функціонування і удосконаленню судових автоматизованих систем управління різного типу.

19. Пипченко А. Н. Техническая эксплуатация одно- и двухтопливных двигателей Wartsila-Sulzer / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, **В. А. Шевченко**, И. Н. Табулинский. – Одесса: ТЭС, 2017. – 338 с., [34]:

– розділ, присвячений розробці рекомендацій щодо підвищення ефективності експлуатації судових двигунів.

20. Пономаренко В. В. Судовое высоковольтное оборудование / В. В. Пономаренко, **В. А. Шевченко**: под ред. А. Н. Пипченко. – Одесса: ТЭС, 2017. – 300 с., [35]:

– розділ, присвячений розробці рекомендацій щодо підвищення ефективності експлуатації судового високовольтного електрообладнання.

21. Ya. Volyanskaya, S. Volyanskiy, O. Onishchenko, **V. Shevchenko**. Reserch of possibilities of increase of exactness of stabilizing of ship on a course / SEA-CONF 2019. 5th Internat. Conf., 2019, May 17-18, Constanta, “Mircea Cel Batran” Naval Academy, [36]:

– розробка математичної моделі САУ, аналіз результатів.

22. **Шевченко В. А.** Підготовка фахівців з експлуатації високовольтного обладнання з використанням розподільчого пристрою NXAIR фірми Siemens / **В. А. Шевченко**, С. Ф. Самонов, В. О. Дубовик // IX Міжн. наук.-техн. конф. "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика" (SEEEA-2019). 5-6 грудня 2019 р. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 22- 24., [37]:

– аналіз і дослідження принципів функціонування розподільчого пристрою, побудова методики роботи з ним.

23. **Шевченко В. А.** Проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективності і тенденції розвитку складних судових технічних систем і комплексів / **В. А. Шевченко**, О. А. Онищенко // IV Міжн. наук.-практ. конф.

"Perspectives of world science and education", 25-27 грудня 2019 року, Осака, Японія, CPN Publishing Group. – С. 86-96, [38]:

– загальна постановка проблеми підвищення енергетичної ефективності складних суднових технічних систем, аналіз відомих рішень, висновки.

24. Hvozdeva I. Problems of improving the diagnostic systems of marine diesel generator sets / I. Hvozdeva, V. Budashko, V. Myrhorod, **V. Shevchenko** // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 25-29 Feb., 2020, pp. 350-354, IEEE. <https://easychair.org/cfp/tcset-2020> (**Scopus**), [39]:

– загальна постановка завдань діагностування і підвищення ефективності обслуговування суднових дизель-генераторних установок, аналіз можливих рішень, висновки.

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	31
ВСТУП.....	33
1. АНАЛІЗ СТАНУ І ПРОБЛЕМ РОЗВИТКУ ПРИНЦИПІВ УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМИ ТЕХНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ І КОМПЛЕКСАМИ ПРИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	45
1.1. Проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективності і тенденції розвитку СТС і К (на прикладі суднових електроенергетичних систем). Гіпотези дослідження.....	45
1.2. Аналіз відомих способів підвищення енергетичної ефективності СЕЕС.....	51
1.3. Визначення рівнів абстрактного опису суднових систем управління і оцінок результуючої ефективності складних СТС і К.....	57
Висновки до розділу 1.....	60
2. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ І СИНТЕЗУ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ СТС і К.....	61
2.1. Визначення методології дослідження СТС і К: теорія, принципи, методи.....	61
2.2. Методологія і принципи побудови алгоритмів управління, ергатичного і ергономічного аналізу та оцінювання ефективності експлуатації СТС і К.....	69
2.3. Методологія побудови розподілених ієрархічних АСУ СТС і К.....	78
Висновки до розділу 2.....	97
3. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ПІДТРИМКА СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ СТС і К.....	99
3.1. Принцип автоматизованого виміру і контролю навантаження САЕЕС із використанням імовірнісного підходу.....	99
3.2. Вимірювання електроенергетичних параметрів САЕЕС на основі мультипліційної обробки гармонійних величин.....	108
Висновки до розділу 3.....	114

4. СИНТЕЗ БАЗОВИХ АЛГОРИТМІВ ВИЩОГО РІВНЯ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ СТС І К.....	115
4.1. Семантика і декомпозиція реалізованих завдань управління складними СТС і К.....	115
4.2. Синтез алгоритмів програми управління супервізора координатора.....	123
4.3. Розв'язання завдання координованого управління СЕЕС при змінах навантаження.....	141
4.4. Управління СЕЕС за умови мінімуму витрати палива та з урахуванням метеорологічних умов плавання.....	150
4.5. Управління СЕЕС у нормальних і аварійних режимах роботи.....	162
Висновки до розділу 4.....	170
5. УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ НИЖНЬОГО РІВНЯ У ІЄРАРХІЧНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ СТС І К (НА ПРИКЛАДІ САЕЕС)	172
5.1. Аналіз структур розподілених систем управління СТС і К.....	172
5.2. Особливості синтезу алгоритмів ПЗ супервізора локальних підсистем управління.....	175
5.3. Процеси пуску та зупинки дизель-генераторів у розподілених МП-системах управління СТС і К.....	181
Висновки до розділу 5.....	192
6. СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИНХРОНІЗАЦІЄЮ СУДНОВИХ ГЕНЕРАТОРНИХ АГРЕГАТІВ.....	193
6.1. Постановка завдання синхронізації генераторних агрегатів.....	193
6.2. Побудова моделі управління процесу синхронізації генераторних агрегатів.....	197
6.2.1. Побудова моделей бази даних і конфігурації системи управління.....	197
6.2.2. Використання результатних функцій при опису моделей основних перетворювачів системи управління.....	200

6.2.3. Використання принципу відносного руху об'єктів при аналізі елементів системи управління.....	203
6.2.4. Критерії оптимізації і дуальне управління процесом синхронізації генераторних агрегатів.....	208
6.3. Практичні способи розв'язання завдань управління синхронізацією.....	214
6.3.1. Розв'язання завдання оптимального управління методом припасування частоти синхронізованого об'єкта.....	214
6.3.2. Визначення моменту включення генераторних автоматів при детермінованій постановці завдання синхронізації.....	221
6.3.3. Визначення моменту включення генераторних автоматів при стохастичній постановці завдання синхронізації.....	225
6.4. Фізична модель САЕЕС і результати експериментів з синхронізації генераторних агрегатів	232
Висновки до розділу 6.....	249
7. УДОСКОНАЛЕННЯ УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ І КОМПЛЕКСАМИ МОРСЬКИХ СУДЕН ПРИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В УМОВАХ ЗБУРЕНЬ ПРИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУРСУ, СТЕЖЕННІ І МАНЕВРУВАННІ.....	253
7.1. Особливості експлуатації систем стабілізації курсу морських суден в умовах збурень.....	253
7.2. Побудова математичних моделей динаміки морських суден на основі експериментальних досліджень.....	258
7.2.1. Модель процесу маневрування судна.....	259
7.2.2. Моделювання процесу маневрування з попередньо визначеними значеннями коефіцієнтів.....	261
7.3. Математичне моделювання елементів систем стабілізації курсу і динамічного позиціонування суден.....	266

7.3.1. Математичне моделювання системи ГСК морського судна.....	268
7.4. Управління судном при стабілізації курсу у різних експлуатаційних умовах.....	272
7.4.1. Пропорційно-диференційний алгоритм управління.....	275
7.4.2. Нейро-мережний алгоритм управління.....	279
7.4.3. ПД і релейний алгоритми управління.....	282
7.5. Двоканальна система стабілізації курсу судна.....	286
7.6. Управління маневруванням судна.....	294
Висновки до розділу 7.....	300
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	303
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	308
ДОДАТКИ.....	343

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АВ	- автоматичний вимикач;
АД	- асинхронний електричний двигун;
АСУ	- автоматизована система управління;
АЦП	- аналого-цифровий перетворювач;
ВГ	- валогенератор;
ВМТ	- верхня мертва точка;
ГА	- генераторний агрегат, генераторний автоматичний вимикач (за змістом);
ГД	- головний двигун;
ГРК	- гвинт регульованого кроку;
ГРЩ	- головний розподільний щит;
ГФК	- гвинт фіксованого кроку;
ДГ	- дизель-генератор;
ЕПП	- електропривод пристрою підруля;
ІВС	- інформаційно-вимірювальна система;
КЗ	- коротке замикання;
КК	- керуючий контролер;
КТР	- карта технічного рівня;
ЛМС	- людино-машинна система;
ЛК	- локальний координатор;
ЛП	- локальна підсистема;
ЛСА	- логічна схема алгоритму;
МП	- мікропроцесор;
НДДКР	- науково-дослідна та дослідно-конструкторська робота;
НЕ	- накопичувач електроенергії;
ООП	- об'єктно-орієнтований програмний продукт;
ПД	- програма-диспетчер;
ПЗ	- програмне забезпечення;

ПК	- пропульсивний комплекс судна;
ПКЗ	- пристрій контролю й захисту;
ПУ	- пропульсивна установка;
РС	- режимні споживачі;
САУ	- система автоматичного управління;
СУ	- система управління;
САЕЕС	- суднова (автоматизована) електроенергетична система;
СЕУ	- суднова енергетична установка;
СТС і К	- судові технічні системи і комплекси;
ТАУ	- теорія автоматичного управління;
УТГ	- утилізаційний турбогенератор;
ФСО	- функціонально самостійна операція;
ЦТ	- цифрова техніка;
ЦАП	- цифро-аналоговий перетворювач;
ФКРП	- фільтрокомпенсатор реактивної потужності;
ACS	- automated control system;
DCG	- (direct current generator) генератор постійного струму;
GS	- generating set;
MSB	- (main switchboard) головний розподільний щит;
SCADA	- (supervisory control and data acquisition) диспетчерське управління і збір даних, програмний пакет;
SEPS	- ships' electrical power system;
SV	- (supply vent) вентилятор припливного повітря;
STSC	- ship technical systems and complexes.

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних морських транспортних технологіях, сучасному суднобудуванні, методах експлуатації, обслуговування та ремонту морських та річкових суден, головними є категорії безпеки, екологічності та економічної ефективності судноплавства. Вирішення суперечливих завдань раціонального управління різноманітними технологічними процесами у складних суднових технічних системах і комплексах (СТС і К) безпосередньо пов'язане із означеними категоріями – забезпеченням високоефективної експлуатації, екологічності, ремонту й обслуговування морських і річкових суден. Ці категорії вимагають пошуку нових, нетривіальних, вдосконалення і уніфікації існуючих технічних рішень, урахування можливих аварійних режимів на судні через дії операторів, тощо. У зв'язку із цим, процеси управління технічними системами і комплексами морських та річкових суден повинні бути у максимальному ступені автоматизовані, програмно і апаратно узгоджені та уніфіковані. Саме такий, синергетичний, підхід використовують при синтезі, проектуванні або модернізації існуючого суднового обладнання, що забезпечує мінімізацію суб'єктивного впливу людського фактору, забезпечує режими найбільш ефективної, безпечної та екологічної експлуатації, технічного обслуговування і ремонту (ТОР) суден різного цільового призначення.

Процеси управління різноманітними складними СТС і К сучасного судна та технічні засоби, що їх забезпечують, нерозривно пов'язані з якістю енергетичного забезпечення судна, а саме – електропостачання. Це пояснюється тим, що втрата електропостачання призводить до повної втрати керованості судна. Тобто, для забезпечення технічної безпеки судноплавства найголовнішими, серед інших складних СТС і К, є суднові електроенергетичні системи і установки (СЕЕС, СЕЕУ). У той же час, СЕЕС мають найбільш складну конфігурацію серед інших СТС і К: у їх структуру входять генераторні агрегати (ГА), різноманітні системи управління, складні системи розподілу та перетворення енергії, системи захисту, тощо. Поряд зі складністю своєї конфігурації, СЕЕС характеризуються і безперервним зростанням встановле-

ної потужності, що вимагає підвищення швидкодії існуючих систем управління, захисту й забезпечення ефективності процесів синхронізації джерел електричної енергії на судні.

Таким чином можна визначити, що актуальність дослідження полягає у тому, що у галузі технічної експлуатації суден, досліджень і проектування сучасних СТС і К сьогодення вимагає:

- удосконалення процесів контролю передачі енергії з динамічними принципами управління і стабілізації параметрів СЕЕС із мінімізацією невідворотних втрат під час її передачі і перетворення, підвищення експлуатаційної гнучкості, сумісності, надійності і стійкості СЕЕС;

- створення нових, удосконалення і раціоналізації існуючих систем і структур управління різноманітних СТС і К під час їх експлуатації і, зокрема, при їх дослідженні і проектуванні.

У зв'язку із означеним, затребуваними практикою і актуальними чинниками подальшого розвитку морського й річкового флоту України та, зокрема, необхідністю вирішення визначальних проблем підвищення ефективності комерційної складової експлуатації і ремонту СТС і К, суднових автоматизованих електроенергетичних систем (САЕЕС) у цілому, є енергозбереження, економічність використання пального, надійність і безперебійність електропостачання, урахування міжнародних екологічних вимог при створенні і експлуатації.

У дисертації сформульована і визначена актуальна *науково-технічна проблема* – розробка і створення нових і вдосконалення існуючих систем управління технологічними процесами різноманітних складних СТС і К, зокрема – САЕЕС, та підвищення ефективності експлуатації суден у цілому, *неможливі* без визначення і використання сучасних теоретичних методів синтезу алгоритмів ефективного управління технологічними процесами різноманітних СТС і К складної конфігурації.

Дослідження переслідує вирішення актуального запиту практики – обрання такого складу СТС і К із організацією управління ним таким чином, щоб судна безперебійно отримували електроенергію необхідної якості, фун-

кціонували із максимально можливим ККД при широкому спектрі динамічних навантажень на генераторні агрегати та на судно у цілому, при змінюваних погодних умовах та із урахуванням додаткових обмежень, які накладаються міжнародними вимогами.

Проблема вдосконалення процесів управління судновими технічними системами і комплексами, у тому числі СЕЕС, знаходиться у центрі уваги розробників і авторитетних фахівців з технічної експлуатації флоту. Серед них слід відзначити таких, як Аллаєв К. Р., Баранов А. П., Болотин Б. І., Будашко В. В., Вайнер В. Л., Варбанець Р. А., Веретенник О. М., Вичужанін В. В., Вишневський Л. В., Голіков В. А., Константинов В. П., Красношайка М. М., Мелешкин Г. А., Муха М. Й., Нікольський В. В., Рожков С. О., Сиром'ятников В. Ф., Хайдуков О. П., Яровенко В. О., Gross T., Irida T., Takata S., Veda R., Nallen R. і інших. На основі відомих досягнень і особистих досліджень висунута *гіпотеза* – вирішення означеної проблеми вдосконалення процесів управління складними СТС і К, у першу чергу, пов'язане із визначенням раціональної конфігурації та структури систем управління, при умові застосування запропонованого авторського методу синтезу алгоритмічного і апаратного забезпечення. Із аналізу існуючого стану розвитку складних СТС і К у дисертації визначена і сформульована наявність невирішених *наукових протиріч*.

По-перше. Розробка методів ефективного управління технологічними процесами та експлуатацією морських транспортних засобів різного типу обмежена істотним комплексом суперечливих, конфліктних, а у деяких випадках і взаємовиключних, факторів. У тому числі:

- необхідністю знаходження компромісу між економічністю, надійністю (безперебійністю) енергопостачання і екологічністю функціонування СЕЕС;
- необхідністю розробки ефективних методів пошуку раціональних конфігурацій різноманітних СТС і К, їх систем управління для різних суден і відсутністю вільного (ліцензійного) доступу до базових алгоритмів функціонування таких систем, можливостей їх корегування.

По-друге. Необхідністю розробки ефективних методів управління судновими технологічними процесами і:

- відсутністю раціональних і апробованих методів математичного опису та верифікації процесів їх управління;
- відсутністю таких необхідних методів і засобів швидкодіючого виміру параметрів електричної енергії у суднових системах електропостачання, що відповідають сучасному рівню розвитку цифрової керуючої техніки;
- затребуваністю оптимізації за низкою показників режимів роботи суднових енергетичних систем при змінах навантаження і погодних умов і відсутністю принципів їх реалізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, 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.) та виконане відповідно до Морської доктрини України на період до 2035 року. (Постанова № 1307 Верховної Ради України від 07.10.2009 р., 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.).

Дисертаційна робота виконана у рамках планових наукових досліджень, у яких здобувач є автором окремих розділів:

- держбюджетної науково-дослідної роботи ДР № 0115U003582 "Підвищення ефективності, надійності і якості функціонування суднових енергетичних установок" (2016-2017 р.р.) Національного університету "Одеська морська академія";
- держбюджетної науково-дослідної роботи ДР № 0117U005137 "Методи і засоби підвищення ефективності функціонування та експлуатації перспективних суднових енергетичних установок" (2018-2022 р.р.) Національного університету "Одеська морська академія".

Також, дисертаційна робота виконана у межах:

- планів робіт наукового семінару "Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок" Наукової Ради Інституту електродинаміки Національної академії наук України з проблеми "Наукові осно-

ви електроенергетики" (Військова академія, м. Одеса), де здобувач є виконавцем окремих його етапів;

– фінансованих на конкурсній основі науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт (НДДКР), тематику яких схвалено Науковою Радою МОН України (Секція 7 - "Енергетика та енергоефективність"), а саме робіт, з держреєстрацією ДР 0119U001651 ("Енергоефективна система позиціонування судна подвійного призначення", 2019-2020 р.р.) та ДР № 0120U102577 ("Енергетична установка, пропульсивний комплекс і система управління автономного плавального апарата подвійного призначення", 2020-2021 р.р.). Напрями дослідження цих НДДКР отримали підтримку з боку Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України (ЦНДІ ОВТ ЗСУ, лист №189/1/1029 від 19.03.2020 р.) з сумарним грантовим фінансуванням у 1,140 млн. грн (КПКВК 2201040 і 2201020 "Наукова та науково-технічна діяльність закладів вищої освіти та наукових установ"), де здобувач у якості наукового співробітника прийняв участь у дослідженнях і підготовці окремих розділів НДДКР.

Мета і завдання дослідження. Виходячи зі сформульованих запиту практики, науково-технічної проблеми й наукових протиріч, визначені наступні мета й завдання дослідження. **Метою** дослідження є підвищення ефективності процесів управління та експлуатації різноманітних суднових технічних систем і комплексів складної конфігурації, яка вирішується на основі розробки і практичного використання запропонованих авторських методів синтезу систем управління основними судновими технологічними процесами. **Головними завданнями** дослідження є:

- структуризація систем управління судновими технологічними процесами для визначення раціональної вихідної структури означених систем та їх інформаційних потоків;
- пошук і розробка раціональних методів верифікації та математичного опису способів управління технологічними процесами суднових технічних систем і комплексів;

- розробка ефективних і вдосконалення існуючих методів вимірювання параметрів електроенергії суднових електроенергетичних систем;
- оптимізація процесів управління судновою електроенергетичною системою за умови забезпечення мінімуму витрати палива і урахуванням погодних умов мореплавання;
- створення методів ефективного управління судновою електроенергетичною системою при її динамічних навантаженнях;
- синтез базового алгоритму управління судновою електроенергетичною системою при нормальних і аварійних режимах її роботи;
- розробка методів синтезу алгоритмів ефективного управління синхронізацією суднових генераторних агрегатів при детермінованих і стохастичних умовах роботи;
- удосконалення існуючих та створення основ побудови високоефективних систем управління технічними системами і комплексами морських суден різного призначення при їх експлуатації у режимах стабілізації курсу та проходженні траєкторії на маршруті.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування складних суднових технічних систем і комплексів, зокрема – електроенергетичних установок складної конфігурації та гвинто-стернових комплексів (ГСК), при експлуатації суден у нормальних і аварійних умовах.

Предметом дослідження є сукупність теоретико-методологічних, проектних і прикладних методів управління основними технологічними процесами суднових технічних систем і комплексів, суднових електроенергетичних установок, ГСК, експлуатації суден у цілому.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі поєднані теоретичні, чисельні та експериментальні методи досліджень. Теоретичні методи розроблялися у випадках, коли доводилося стикатися з новими проблемами, що не досліджувалися раніше, або якщо застосування відомих методів виявлялося нерациональним для вирішуваних завдань. За допомогою теоретичних розробок удосконалені розрахункові методи і алгоритми, що їх реалізують. Експериментальні методи використовувались для верифікації отриманих за допомо-

гою математичних моделей результатів. При цьому експерименти проводилися на розробленій фізичній моделі – багатофункціональному тренажері суднових енергетичних установок зі змінною структурою і авторськими алгоритмами управління, що дозволило максимально наблизити теоретичні дослідження до вирішення практичних завдань і що підтверджено відповідними актами використання результатів. Дані, отримані у результаті експериментальних досліджень і отримані теоретичні результати зіставлені і добре корелюються. Ці зіставлення підтверджують достовірність отриманих нових наукових результатів, які одержані за допомогою запропонованих здобувачем алгоритмів управління складними СТС і К.

Наукова цінність дослідження визначена вирішенням основних наукових завдань. Здобувачем особисто отримані наступні **нові наукові результати**, де у рамках вирішення сформульованої науково-технічної проблеми, проведено аналіз існуючого стану і вперше визначені невирішені до сьогодні актуальні завдання розвитку теорії та практики забезпечення ефективного управління і експлуатації складними СТС і К:

- вперше визначено, що алгоритмічний і структурний синтез АСУ СЕЕС зводиться не тільки до опису з попереднім моделюванням процесів управління, але й до вирішення комплексу оптимізаційних завдань, що у результаті забезпечує, зокрема, підвищення швидкодії і точності процесів управління СТС і К, їх економічності, забезпечує необхідні показники екологічності та досягання заданого раціонального співвідношення апаратної і програмної частини системи;

- вперше встановлено, що різноманіття морських суден за технологічним призначенням диктує застосування не тільки різних типорозмірів генераторних агрегатів, а і висуває необхідність вирішення ряду нових завдань, пов'язаних, перш за все, із уніфікацією СЕЕС, як об'єктів управління та технічних засобів автоматизації, обранням раціональної конфігурації ГА, застосуванням попередньо визначених підходів їх використання для окремих режимів, що забезпечує судно енергією необхідної якості та раціональне завантаження окремих ГА;

- вперше запропоновано базовий алгоритм функціонування дворівневої розподіленої системи управління СЕЕС, яка відрізняється урахуванням нор-

мальних і аварійних режимів, що дозволяє прогнозовано визначати раціональні конфігурації СЕЕС і алгоритми функціонування їх систем управління;

– вперше запропоновано реалізацію принципу швидкодіючого вимірювання параметрів генерованої енергії, який відрізняється використанням методу мультипліційної обробки дискретної та аналогової інформації вимірюваних величин, що надає можливість за час, який не перевищує один період синусоїдальної напруги, із заданою точністю, визначати: а) лінійну напругу; б) фазний струм; в) модуль фазового куту потужності; г) частоту струму і напрямок передачі потужності;

– вперше запропоновано використання принципу автоматизованого управління судновою електроенергетичною системою, який відрізняється: а) урахуванням динаміки процесів змінювання навантаження; б) використанням авторського методу "гнучких порогів", який ураховує умови мінімуму витрати палива та погодні умови, що дозволяє оптимізувати склад і завантаження суднових ГА;

– вперше запропоновано методику визначення часових затримок на пуск і відключення резервних суднових ГА в умовах нестачі або надлишку генерованої енергії, яка відрізняється гнучким визначенням часових затримок, що дозволяє уникнути передчасну зміну складу ГА;

– вперше запропоновано метод управління частотою джерел енергії, який відрізняється адаптивним обчисленням випереджаючого імпульсу на включення судового ГА, що дозволяє суттєво підвищити ефективність процесу синхронізації джерел енергії у різних умовах експлуатації та знизити зрівняльні струми;

– удосконалені системи управління гвинто-стерновими комплексами морських суден при різних експлуатаційних умовах за рахунок використання запропонованих методик ідентифікації параметрів і подальшої верифікації математичних моделей суден, оптимальних типів регуляторів, двоканальних систем і еталонних моделей у контурі управління (ГСК), що дозволяє синтезувати високоефективні системи стабілізації курсу судна та стеження за його траєкторією на маршруті.

Практична цінність дослідження полягає у тому, що отримані у дисертації основні результати можуть використовуватися при визначенні загальної архітектури складних СТС і К, яка гарантує їх високу експлуатаційну ефективність, у тому числі – при експлуатації суден у складних умовах плавання. Основні результати застосовані під час навчання курсантів морських закладів вищої освіти, при підвищенні кваліфікації суднових механіків і електромеханіків, зокрема – при використанні у "Повномасштабному тренажері автоматизованої суднової електроенергетичної установки" запропонованих авторських алгоритмів управління (акт впровадження від 12.04.2019 р.).

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені у виробничу діяльність ТОВ "Бюро корабельних інженерів" (акт впровадження від 24.04.2019 р.), у Державній службі морського і річкового транспорту України (акт впровадження Державного підприємства "Науково-дослідний проектно-конструкторський інститут морського флоту України" (УкрНДІМФ) від 12.08.2019 р.), ТОВ "СКМ Марін Сервіс" (акт впровадження від 24.12.2018 р.), ТОВ "Сервіс Транс Балк" (акт впровадження від 17.12.2018 р.), у Інституті післядипломної освіти "Одеський морський тренажерний центр", (акт впровадження від 18.10.2018 р.), у навчальному процесі Національного університету "Одеська морська академія" (акт впровадження від 11.04.2019 р.), а також пройшли апробацію на наукових семінарах з проблеми "Наукові основи електроенергетики" Наукової Ради Інституту електродинаміки НАН України (Науковий семінар "Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок", 2016-2020 р.р., довідка від 22.05.2020 р.) де встановлено, що результати дослідження мають актуальність, наукову новизну та практичну значущість при проектуванні, створенні та експлуатації складних СТС і К.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота виконана здобувачем самостійно, без співавторів. Зокрема, без співавторів здобувачем: а) проведено верифікацію функціональних алгоритмів системи управління багатоагрегатної СЕЕС; б) запропоновано принцип швидкого оцінювання параметрів СЕЕС та синтезовані алгоритми управління валово- і дизель-генераторними агрегатами; в) проведено оптимізацію процесів управління СЕЕС за умов мінімізації витрат

пального та з урахуванням метеорологічних умов плавання; з) вирішено проблему автоматизації процесів оптимального маневрування судна і визначені напрямки удосконалення її вирішення; д) досліджені процеси переходу судна на заданий курс при різних законах управління та проведено аналіз роботи СТС і К управління курсом судна в умовах періодичних збурювальних впливів на судно.

Без співавторів запропоновані нові принципи і методи: а) вирішення завдань управління процесами пуску і зупинки ГА у складі СЕЕС; б) вимірювання і контролю навантаження СЕЕС з використанням імовірнісних характеристик; в) синтезу алгоритмів верхнього рівня управління СЕЕС; г) управління "підгонкою" частоти та процесами автоматичної синхронізації судових ГА (у детермінованих і стохастичних умовах експлуатації).

При практичній реалізації запропонованих рішень, здобувачем, без співавторів, визначені особливості експлуатації СТС і К з двигунами *MAN B&W-ME*, визначені вимоги до удосконалення тренажерів машинного відділення суден у системі освіти, навчання і досліджень, наведені перспективи розвитку цих тренажерів у частині експлуатації СЕЕС і установок.

У опублікованих у співавторстві наукових роботах, у дисертації використані тільки ті положення і результати, які належать авторові особисто. Це наступні роботи. [2] – загальна постановка завдання та побудова принципу управління електроенергетичною установкою судна; [3] – постановка завдання і розробка математичної моделі гвинта регульованого кроку; [7] – проведення експериментів і верифікація математичної моделі судна; [8] – розробка математичної моделі судна, її уточнення, аналіз результатів; [9] – методика приведення навантаження до куту повороту стерна судна у математичній моделі системи управління; [18] – запропоновано принцип побудови алгоритмів управління судною енергетичною установкою, що функціонує у складному пропульсивному комплексі; [19] – постановка завдання, пропонування робастного алгоритму управління, аналіз результатів; [20] – узагальнення рекомендацій, визначення перспективних напрямків досліджень дизель-електричних суден, обладнаних азимутними двигунами; [21] – розробка і уточнення математичної моделі, аналіз результатів; [22] – розділ, присвячений

експлуатації суднових енергетичних установок; [24] – уточнення математичної моделі, аналіз результатів, висновки; [25] – оцінювання характеристик і вибір параметрів, що забезпечують задану якість функціонування складних багатомасових систем; [26] – методика урахування змінювання навантаження, висновки; [28] – розробка математичної моделі гребного гвинта, аналіз результатів; [30] – розділ, присвячений визначенню проблем експлуатації і удосконаленню управління судновими двигунами; [31] – розділ, присвячений розробці рекомендацій щодо підвищення ефективності експлуатації і управління судновим електрообладнанням; [32] – розділ, присвячений аналізу принципів функціонування складних автоматизованих суднових механічних систем і комплексів; [33] – розділ, присвячений аналізу функціонування і удосконаленню суднових АСУ різного типу; [34] – розділ, присвячений розробці рекомендацій щодо підвищення ефективності експлуатації суднових двигунів; [35] – розділ, присвячений розробці рекомендацій щодо підвищення ефективності експлуатації суднового високовольтного електрообладнання; [36] – розробка математичної моделі САУ, аналіз результатів; [37] – аналіз і дослідження принципів функціонування розподільчого пристрою, побудова методики роботи з ним; [38] – загальна постановка проблеми підвищення енергетичної ефективності складних суднових технічних систем, аналіз відомих рішень, висновки; [39] – загальна постановка завдань діагностування і підвищення ефективності обслуговування суднових дизель-генераторних установок, аналіз рішень, висновки.

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи доповідались, обговорювались, були відображені і схвалені на наступних наукових заходах: *Proceedings of the 13th International Conference on Engine Room Simulators, Odessa, NU "OMA", September 20-21, 2017*; Матеріалах 9-ї Міжнародної наук.-практ. конф. "Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування", 13-14 вересня 2018 р., Херсон, Херсонська державна морська академія; Матеріалах наук.-метод. конференції "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 5-6 грудня 2018 р. і 2019 р., Одеса, Національний університет "Одеська морська академія"; науковому

семінарі "Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок" Наукової Ради Інституту електродинаміки Національної академії наук України з проблеми "Наукові основи електроенергетики", Одеса, Військова академія, 2016-2020 роки; *5th International Conference "SEA-CONF 2019"*, "Mircea Cel Batran" Naval Academy, May 17-18, 2019, Constanta; IV Міжн. наук.-практ. конф. "*Perspectives of world science and education*", 25-27 грудня 2019 року, Осака, Японія; *15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectrtronics, Telecommunications and Computer Engineering*, 25-29 Feb., 2020, Slavske.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 39 наукових праць (з них 15 – одноосібні). Зокрема, 26 основних публікацій у наукових профільних виданнях (з них 5 публікацій, що входять до наукометричних баз даних *Scopus* і *Web of Science* та 2 монографії), 6 навчально-наукових посібників, 7 доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій (з них 1 публікація, що входить до наукометричної бази даних *Scopus*).

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається з анотацій, переліку умовних скорочень, вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становить 350 сторінок, де, крім основного тексту, містяться 17 таблиць і 84 рисунків. Список використаних джерел містить 331 найменування.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ І ПРОБЛЕМ РОЗВИТКУ ПРИНЦИПІВ УПРАВЛІННЯ СУДНОВИМИ ТЕХНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ І КОМПЛЕКСАМИ ПРИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1.1. Проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективності і тенденції розвитку СТС і К (на прикладі суднових електроенергетичних систем). Гіпотези дослідження

Сучасне морське судно містить безліч різноманітних ТС і К, взаємодіючих, різних за призначенням і принципом дії [38, 41, 43, 45]. Слід вважати, що будь-яка складна СТС, це штучно створена безліч програмно-апаратних підсистем і елементів, що перебувають у однозначних і певних зв'язках, утворюючи цілісність і єдність для досягнення заданої мети функціонування системи. У цілому, управління СТС і К – процес, необхідний для формулювання й досягнення заданої мети, здійснюваний шляхом прогнозування, планування, організації, координації й контролю над його функціонуванням.

Комплексний і всеосяжний аналіз стану завдань розвитку теорії й практики управління складними СТС і К, при їх експлуатації на сучасному судні, вкрай складний і, найчастіше, носить приватний характер [57-60]. Виходячи з [28, 57, 59-63] можна вважати, що на будь-якому морському судні найбільш відповідальними, важливими й складними є:

а) САЕЕС – суднова автоматизована електроенергетична система, що є сукупністю різних електроенергетичних комплексів, підсистем і елементів, призначених для виробництва, перетворення, розподілу електроенергії та забезпечення стійкого електропостачання суднових споживачів і яка функціонує у автоматизованому режимі;

б) гідромеханічний комплекс судна, що включає корпус судна та пропульсивну установку, у якій енергія робочого тіла перетворюється у упор, що спонукає рух корпусу судна. Пропульсивна установка (ПУ) є виконавчою частиною головної енергетичної установки судна й містить рушії, валопроводи, головні судові передачі і двигуни.

Безумовно, САЕЕС і гідромеханічний комплекс судна являють собою складні людино-машинні системи (ЛМС), де усі елементи згруповані і сформовані за функціональним призначенням. Проведемо аналіз найбільш важливих завдань розвитку й практики управління СТС і К на прикладі САЕЕС.

Так, САЕЕС поєднує групи елементів – первинні двигуни, ГА, головні розподільні щити (ГРЩ), регулятори, пристрої автоматизації й контролю, захисту, управління й інші елементи, зі складним характером взаємодії один з одним. Основні збурювання, що діють на САЕЕС, є зміни навантаження і метеорологічних умов плавання, виникнення аварійних і перед-аварійних ситуацій. Крім збурювань є обмеження, обумовлені вимогами до захисту навколишнього середовища [64], у тому числі у частині запобігання забруднення суднами сполуками SO_x і NO_x у вихлопних газах. Адаптація до таких збурювань і обмежень у САЕЕС повинна відбуватися шляхом зміни складу ГА, перерозподілу навантажень між ними, впливу на групи споживачів [65-70].

Оскільки управління є процесом збору, обробки й передачі інформації, тому суттю синтезу нової автоматизованої системи управління (АСУ) у складі САЕЕС, повинне бути формування цілеспрямованих потоків інформації, а також удосконалювання систем вироблення й прийняття оперативних рішень [71-73]. Специфіка дослідження САЕЕС, що ставляться до класу складних ЛМС [74-76], полягає у різноманітності розв'язуваних завдань і викликає необхідність застосування математичної логіки, теорії алгоритмів і формальних систем, теорії оптимізації та інших теоретичних методів [77, 78].

Методологія створення САЕЕС, як ЛМС [75, 76], багато у чому визначає ефективність кінцевих результатів (див. Розділ 2). Тому, створення й управління САЕЕС повинне опиратися на сучасні концепції побудови складних СТС і К. Наприклад, це вироблені на основі прикладного застосування сучасної теорії (складних систем [80-83], системного підходу [77, 78, 84], обробки даних [85-88], математичного моделювання [89-96], теорії автоматичного [97-103] і оптимального управління [103-108] та інших) і які забезпечують високу ефективність функціонування СТС і К. Дотримуючись цього підходу,

ефективність (у першу чергу – енергетична) САЕЕС розглядається не тільки з позицій підвищення економічності і якості функціонування СТС і К, але й з позицій інформаційного забезпечення, спрямованого на одержання об'єктивної інформації, поповнення знань (бази даних), уточнення припущень і твердження переконань (бази знань) і іншої інформації, використання якої (при експлуатації й проектуванні) дозволяє суттєво підвищити ефективність функціонування складних СТС і К [80-82]. У зв'язку із цим виникають актуальні науково-технічні проблеми створення нових і вдосконалення відомих способів відображення керуючої СТС і К інформації.

Одна із висунутих гіпотез дослідження вважає, що застосування спеціальних знакових систем математики [109-119], як моделей певних істотних фрагментів станів процесу управління або об'єкта управління, дозволяє забезпечити високу ефективність: а) функціонування автоматизованих СТС і К; б) практичної діяльності суднових фахівців з експлуатації цих систем. При використанні представленої гіпотези, слід вважати, що найбільш трудомістким завданням синтезу високоефективних, у першу чергу – енергетично ефективних, АСУ СТС і К, є представлення їх опису формальною мовою функціонування [109-113], формалізація локальних і глобальних завдань управління, визначенням основних їх характеристик процесів управління.

Таким чином, наприклад, для автоматизованих СЕЕС, алгоритмічний і структурний синтез [120-122], зводиться не тільки до опису й моделювання алгоритмів управління, але й до розв'язання ряду оптимізаційних завдань [104-107]. Такими завданнями, зокрема, є завдання підвищення швидкодії й точності процесів управління, економічності, забезпечення необхідних показників екологічності, досягнення заданого співвідношення між апаратною і програмною частинами системи й інших [2, 12, 16, 17, 83, 99, 119, 123-127].

Ріст потужності СЕЕС – тенденція, що стійко існує протягом усього розвитку флоту. Установлена потужність СЕЕС, у середньому, зростає вдвічі кожні 20 років. Основними причинами збільшення, є застосування потужних

електрифікованих механізмів і пристроїв (підстернові пристрої, рефрижераторні контейнери, вантажні крани, ліфти, рампи, компресори і інші).

Зрозуміло, що визначальним фактором подальшого розвитку суднової електроенергетики є критерії забезпечення надійного енергопостачання [128, 129] за умови ефективного використання палива [13, 22, 34, 130]. Саме тому, актуальна проблема оптимізації структури САЕЕС за заздалегідь виділеним критерієм, перебуває у центрі уваги провідних фахівців у галузі проектування [45, 46], технічної експлуатації суден і флоту [56-60]. Цю проблему розділимо на дві взаємозалежні, що полягають у: а) комплектації САЕЕС; б) управлінні режимами роботи САЕЕС.

Проблема оптимізації структури за виділеними критеріями зводиться до суперечливих вимог: необхідністю обрання складу САЕЕС (кількість, тип і потужність ГА), але при цьому організації управління нею таким чином, щоб судно: а) безперебійно одержувало електроенергію необхідної якості; б) забезпечувалися умови завантаження первинних двигунів, що відповідають найменшій питомій витраті палива; в) ураховувалися обмеження, що накладаються на їх роботу, у тому числі за гранично припустимими викидами (CO_2 , NO_x , SO_x). Оптимальний режим, як один із критеріїв роботи САЕЕС, повинен забезпечувати рівномірний річний наробіток ГА. Це дозволяє мінімізувати матеріальні й трудові витрати на обслуговування й ремонт, відрахування на амортизацію, тобто суттєво підвищити ефективність експлуатації.

На стадії проектування, у більшості випадків, САЕЕС комплектуються ГА однакової потужності й, залежно від технологічних функцій судна, одинична потужність ГА обирається за умови роботи у кожному експлуатаційному режимі:

- або незмінного числа ГА, яке визначається з урахуванням максимального навантаження електростанції у відповідних режимах;

- або змінного числа ГА, коли у даному режимі у роботі безупинно перебувають основні генератори, а при збільшенні навантаження (до заздалегідь заданої межі споживаної потужності) включається додатковий ГА.

У [32, 59, 35, 38] показано, що найчастіше ці способи комплектації економічно неефективні. У першому випадку, через невелику відносну тривалість пікових навантажень, ГА більшу частину часу працюють із навантаженнями набагато нижче номінальних, і, отже – при знижених ККД. У другому випадку, оскільки основний і резервний ГА за потужністю однакові, паралельна робота їх відбувається при значно знижених навантаженнях протягом тривалого часу, що відбувається саме через недосконалість систем управління САЕЕС. Тривала робота дизель-генератора (ДГ) зі зниженим навантаженням приводить до відкладень на продувних і вихлопних вікнах, клапанах, газотурбонагнетачах, вихлопних колекторах, що знижує економічність ГА й САЕЕС у цілому.

Застосування відомих способів комплектації пояснюється не тільки наближеними методами розрахунків необхідної потужності СЕЕС і недостатньо широкою номенклатурою ДГ, але й прагненням увести ГА від зони загороджувальних характеристик – збільшити резерв генерованої енергії.

Відзначимо, що існуючі АСУ СЕЕС змінюють склад ГА за принципом "жорстких порогів" завантаження [10, 11, 13, 15, 18, 25, 26, 38] і без урахування впливу реальних метеорологічних умов [13] плавання (температури, вологості, барометричного тиску повітря) на функціонування системи.

Авторські дослідження СЕЕС суден типу "*Marco Polo*" показали, що підвищення температури усмоктувального повітря до 45°C знижує потужність дизеля на 18 %. Застосований принцип управління на основі "жорстких порогів" завантаження, приводить до істотного перевантаження ДГ у пікових режимах роботи, а система автоматично уводить у роботу резервний ГА та/або відключає частину другорядних суднових споживачів. Організація ручного управління СЕЕС за принципом "гнучких порогів" є практично нездійсненною, якщо врахувати, що вплив реальних метеорологічних умов плавання на робочі параметри дизелів має складний характер [13].

Розв'язання цієї проблеми вимагає розробки й впровадження комплексу високоінформативних алгоритмів управління (у тому числі й діагностування

[39, 127, 131-134] режимів роботи СЕЕС), що дозволяє безпечно експлуатувати ГА у зонах, близьких до загороджувальних характеристик, підвищуючи у такий спосіб коефіцієнт використання потужності ГА.

Проблему термічного перевантаження первинних двигунів можна розв'язати збільшенням інтенсивності охолодження дизеля. Наприклад, це досягається заміною нерегульованих електроприводів охолодних насосів прісної й забортної води регульованими, які дозволяють, при необхідності, працювати з підвищеною продуктивністю, а також побудовою управління продуктивністю на основі оцінки термічного навантаження первинних двигунів.

Підвищення техніко-експлуатаційних показників СЕЕС можна добитися управляючи співвідношенням власних параметрів дизеля, таких, як циклова подача палива, тиск, вологість, температура надувального повітря, води, що охолоджує. Змінюючи співвідношення між ними, або певні групи параметрів, реалізуються різні програми оптимізації – мінімуму витрати палива, зношування окремих вузлів, зниження інтенсивності нагару та ін.

Заслужовує на увагу застосування сучасних, перспективних для використання у СЕЕС, накопичувачів електроенергії (НЕ), наприклад [135]. НЕ радикально міняє навантажувальний режим ГА – від імпульсного, динамічного, до квазістатичного, що забезпечує близький до номінального режим роботи СЕЕС. НЕ демпфує пікове навантаження, знижує зношування ГА, і експлуатаційні витрати. Застосування накопичувачів різного типу сприяє скороченню часу перерви живлення суднової мережі при раптовому знеструмленні, стимулює впровадження генеруючих установок з поновлюваними та нетрадиційними джерелами.

Одним з допоміжних засобів, при забезпеченні близьких до номінальних умов роботи СЕЕС, є швидкодіючі фільтрокомпенсатори реактивної потужності (ФКРП) [136]. Застосування таких компенсаторів обумовлено двома факторами. По-перше, змінами реактивних навантажень СЕЕС у широких межах ($\cos \varphi = 0,55 \div 0,9$) і, по-друге, викривленнями форми кривої напруги струмами вищих гармонік (що існують у судновій мережі при роботі потуж-

них тиристорних електроприводів або, у загальному випадку, викривленнями струму нелінійних споживачів електроенергії). Однак, основне призначення ФКРП – зниження втрат у судновій електричній мережі.

1.2. Аналіз відомих способів підвищення енергетичної ефективності СЕЕС

Відомі наступні способи підвищення енергетичної ефективності автоматизованих СЕЕС, реалізовані за рахунок застосування: *а)* утилізаційних турбогенераторів (УТГ) і *б)* валогенераторів (ВГ).

Найчастіше, потужність застосовуваних суднових УТГ коливається від 400 до 1250 кВт. Досвід експлуатації показує, що для СЕЕС із УТГ характерним є низький коефіцієнт використання УТГ. Головна причина – втрата потужності в утилізаційному котлі через забруднення його дзеркала випару. Крім того, у економічних режимах роботи головного двигуна на знижених обертах, УТГ не може самостійно забезпечити споживачів електроенергією. Для покриття дефіциту потужності у цьому випадку потрібне включення на паралельну роботу автономного ДГ. З практичного досвіду відомо, що через відмінність властивостей приводних двигунів, їх паралельна робота є недостатньо стійкою, що змушує прибігати або до роздільної роботи ДГ і УТГ, або взагалі не використовувати у таких випадках УТГ. Враховуючи, що дефіцит генерованої потужності при роботі УТГ, як правило, невеликий (до 10-20 % від потужності УТГ) і має епізодичний характер, цю проблему можна розв'язати такими способами: *а)* оптимальною організацією споживаної енергії - шляхом відключення частини допоміжних споживачів, або впливом на споживачів з регульованою продуктивністю; *б)* застосуванням НЕ або поновлюваних джерел; *в)* застосуванням комбінованих установок відбору потужності, наприклад, ВГ і УТГ із оптимізацією процесів управління ними.

Тенденція застосування ВГ у складі СЕЕС є у цей час стійкою. Ефективність ВГ при виробництві електроенергії пояснюється заміною дорогого ди-

зельного палива дешевими сортами важкого або газового палива. Додатковою перевагою застосування ВГ є економія моторесурсу автономних ГА. Слід зазначити, що економія палива СЕУ із ВГ залежить від співвідношення питомих витрат палива ГД і автономних ДГ, ККД ВГ системи й відносної потужності СЕЕС у ходовому режимі. Найбільший ефект від застосування ВГ можна одержати на великотоннажних суднах зі середньообертовими ГД, у яких відношення потужності СЕЕС до потужності, споживаної гребним гвинтом, перебуває у межах $0,04 \div 0,09$. Такі судна, як правило, мають гвинт регульованого кроку (ГРК), що дозволяє працювати ГД із незмінною швидкістю, а ВГ – зі постійною частотою струму.

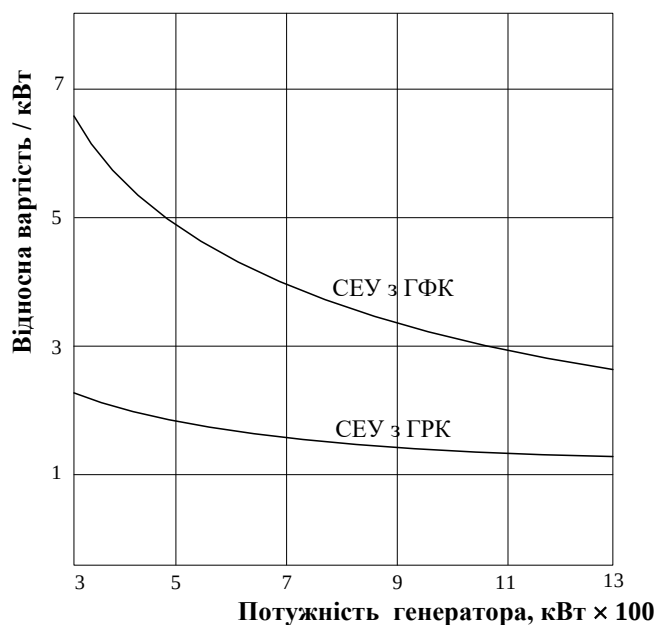


Рис. 1.1. Відносна собівартість ВГ у СЕУ із ГФК і ГРК

Ванні ВГ у ПК із ГСК висловлюються альтернативні судження. Тому дослідження режимів роботи таких комплексів [137-142], з метою визначення техніко-економічної доцільності застосування ВГ, становить особливий інтерес.

Відомо, що для суден із ГРК швидкість ходу V можна змінювати, як частотою обертання n , так і кроком H , із кроковим відношенням гвинта $\phi = H/D$, де D – діаметр окружності, описуваної найбільш віддаленими від вісі точками лопатей гвинта. При цьому, для розв'язання завдання R забезпечення максимального пропульсивного ККД $\eta_{ПК}$ на певних ділянках виміру

Так, для оцінки енергетичної ефективності СЕУ із ВГ фірмою MAN B&W [23, 30, 34, 43] проведені дослідження різних структур пропульсивних установок із ГРК і гвинтом фіксованого кроку (ГФК). Усереднені залежності собівартості різних варіантів розміщення ВГ наведені на рис. 1.1. Проте у [137-139], у відношенні результуючої енергетичної ефективності при застосу-

швидкості ходу судна, необхідно одночасне управління W частотою обертання й кроком гвинта, тобто

$$R: V(N, H, n, g_e) \rightarrow \max \eta_{\text{ПК}} \Rightarrow W, \quad (1.1)$$

де g_e – питома витрата палива.

Ясно, що для кожної заданої швидкості судна $v_i \in V, i = \overline{1, m}$, і $V = \{v_1 \dots v_m\}$, існує певна точка a_i , що є, по суті, оптимумом, тобто – оператором, що дозволяє, виходячи з умови мінімуму витрати палива

$$\int_{t_j}^{t_{j+1}} (g_{ei} - a_i) dt \rightarrow 0, \text{ знайти зміни, що задають впливи на } H \text{ і } n. \text{ Знаходження}$$

значень цих впливів і підтримка їх при будь-яких режимах роботи, забезпечать функціонування СЕУ у режимі мінімальної витрати палива. Якщо врахувати, що кожній заданій швидкості судна існують сюр'єктивні [143] відповідності виду: $A_{g_e} \subseteq V \times g_e$; $A_n \subseteq V \times n$; $A_H \subseteq V \times H$, то умова існування оптимуму реалізована й визначається вираженням:

$$A_n \cap A_H \cap A_{g_e} = \{a_i | a_i \in A_n, a_i \in A_H, a_i \in A_{g_e}\}. \quad (1.2)$$

Однак, при роботі ВГ, застосування цього способу підвищення пропульсивного [139, 141, 142] ККД обмежене вимогами, що пред'являються до якості електроенергії у частині стабілізації частоти генерованого струму ($\Delta f \% \leq 5 \%$), що приводить до істотних втрат потужності. Тому, у окремих режимах роботи, економічно доцільним є вивід з роботи ВГ із перекладом електричного навантаження на автономні ДГ. Таким чином, завдання забезпечення економічної експлуатації СЕУ із ВГ має два (R_1 і R_2) альтернативних розв'язання:

$$\begin{aligned} R_1: V(N, H, n, g_{e\text{ДГ}}, g_{e\text{ГД}}) &\xrightarrow[H=\text{var}]{n=\text{var}} \max \eta_{\text{ПК}} \Rightarrow W_1; \\ R_2: V(N, H, n, g_{e\text{ДГ}}, g_{e\text{ГД}}) &\xrightarrow[H=\text{var}]{n=n_H} \max \eta_{\text{ПК}} \Rightarrow W_2, \end{aligned} \quad (1.3)$$

тобто проблема застосування СЕУ із ВГ неоднозначна і повинна вирішуватися відповідно до глобального критерію проектування судна, з урахуванням

району плавання, діапазону зміни швидкості ходу, тривалості режимів роботи судна (хід, стоянка, маневри) і іншими особливостями експлуатації.

Крім того, потрібно враховувати, що організація економічних режимів роботи пропульсивного комплексу шляхом відключення/включення ВГ задає розв'язання не тільки оптимізаційних завдань розрахунків економічних режимів, але й завдань оперативного керування (пуск, зупинка, синхронізація ДГ і ВГ) на новому, більш високому рівні. Це можливо тільки застосуванням сучасних технічних засобів управління, оскільки часта зміна режимів роботи вимагає передачі ряду функцій від оператора до АСУ.

Значних успіхів підвищення техніко-економічної ефективності ВГ можна добитися шляхом використання їх не тільки у ходовому режимі, але й у режимі маневрів – для живлення електроприводу пристрою підруля (ЕПП). Пояснюється це тим, що потужність ЕПП найчастіше перевищує потужність одного ГА СЕЕС і приводить до ускладнення схем комутації ГРЩ, неоднозначному обранні числа одночасно працюючих ГА та управлінню режимами роботи всієї СЕЕС. Повторно-короткочасний режим роботи потужного ЕПП виявляє динамічні збурювання на СЕЕС, знижує якість електроенергії, викликає обмінні коливання енергії між паралельно працюючими ГА, і, як наслідок, знижує надійність постачання енергією режимних споживачів. Для усунення зазначених недоліків на ряді спеціалізованих суден (див. рис. 1.2), живлення ЕПП забезпечують від ВГ, а живлення інших режимних споживачів (РС) – від автономної електростанції.

Приведемо (рис. 1.3) результати, отримані при дослідженні процесів пуску ЕПП на судні “*Carmania Express*”. Електродвигун ЕПП – асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором (830 кВт, 1637 А, $\cos\varphi_{II} = 0,495$). При роботі ЕПП потужність АД змінюється від 200 до 1000 кВт. Застосування таких АД, потужність яких порівнянна (а іноді й перевищує, як цьому випадку $P_{ЕПП} = 1,1P_{ДГ}$) установлену потужність одного ГА, ускладнює розв'язання завдань, пов'язаних із процесами пуску ЕПП. Прямий пуск АД від загальних шин ГРЩ виключений (за припустимими межами пускового струму й комутації силових ланцюгів електростанції).

Застосування "сильного регулювання" збудження приводить до зменшення у системі запасу стійкості і викликає коливальні процеси. Зменшення коефіцієнту передачі за реактивною потужністю небажане з позиції необхідності стабілізації напруги та розподілу реактивних навантажень.

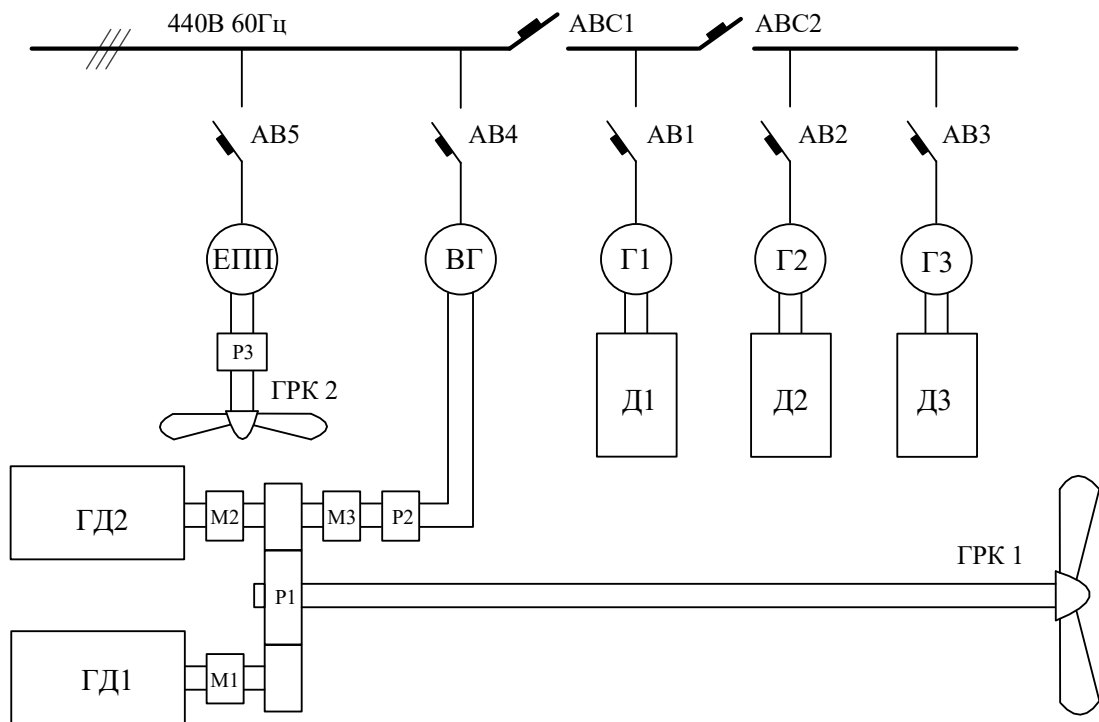


Рис. 1.2. Пропульсивний комплекс судна "Carmania Express"

З осцилограми (рис. 1.3), видно, що перший оберт ротор АД робить за час $t_1 \approx 0,9$ с, а напруга U_3 збудження і струм навантаження I_Γ досягають максимальних значень, у той час як $U_\Gamma < U_n$, оскільки двигун підключається до генератора у момент, коли $U_\Gamma = 0$, з наступним самозбудженням. Система збудження забезпечує форсування зі швидкістю 77 В/с, а напруга на статорі 250 В/с. Протягом другої і третьої секунд розгону, струм статора різко зменшується, що приводить до значного перерегулювання напруги U_Γ до 520 В.

Досвід експлуатації даного комплексу показав, що основний потік відмов у ньому припадає на період пуску ЕПП і характеризується спрацюванням захисних автоматичних вимикачів (АВ) і виходом з ладу механічних передач через ударні моменти. З осцилограм видно, що управління пуском ЕПП за рахунок процесу самозбудження генератора не вирішує завдання об-

меження пускового струму, що викликає необхідність пошуку більш досконалих способів управління струмом збудження ВГ.

Окремої уваги у СЕЕС із ВГ заслуговує використання ДГ, як компенсатора реактивної потужності [136], а також використання ВГ у руховому режимі підкручення гребного валу судна [137, 138, 140], з метою збереження малого ходу судна для забезпечення безпеки мореплавання.

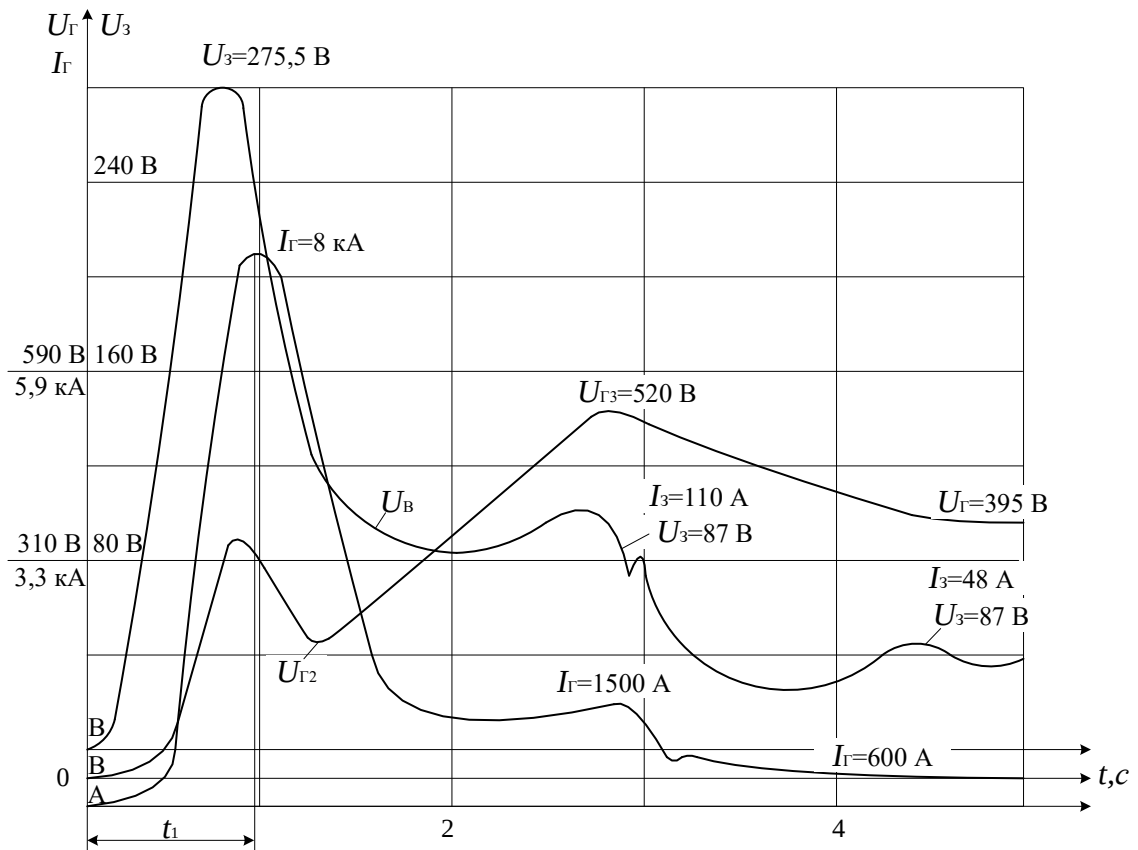


Рис. 1.3. Апроксимовані осцилограми пуску носового ЕПП

Існування безлічі різних типів суден диктує застосування різних типорозмірів ГА й висуває необхідність практичного розв'язання ряду нових, проблемних, завдань, пов'язаних, насамперед із: а) уніфікацією СЕЕС, як об'єктів управління; б) уніфікацією технічних засобів автоматизації; в) обранням раціональної конфігурації ГА; г) різноманітністю підходів використання ГА для окремих режимів; д) забезпеченням необхідної якості електричної енергії й оптимального завантаження ГА.

1.3. Визначення рівнів абстрактного опису судових систем управління і оцінок результуючої ефективності складних СТС і К

Вибір найбільш ефективних (з позицій можливості технічної реалізації й забезпечення якості процесів управління) рівнів абстрактного опису при дослідженні судових ТС і К, є відповідальним, суперечливим і багато у чому визначає ефективність прикладного застосування теоретичних основ побудови МП АСУ складними СТС і К. Огляд сучасного стану абстрактної теорії систем [80-83,109-118, 144, 145] дозволяє вважати, що доцільними є наступні рівні абстрактного опису: лінгвістичний, теоретико-множинний, абстрактно-алгебраїчний, топологічний, логіко-математичний, теоретико-інформаційний, динамічний і евристичний.

Верхнім рівнем опису є лінгвістичний, який ми будемо представляти як деяку сукупність висловлень у вигляді вимог і/або технічних завдань, спрямованих на подальше вдосконалювання СТС і К і складених граматично природньою мовою. Базою даних для лінгвістичного опису є відомості, отримані у результаті аналізу досвіду експлуатації або виконаних техніко-економічних, ергатичних і ергономічних досліджень реальних СТС і К (натурні умови та/або імітаційні моделі). Таким чином, тут виникають завдання абстрактного опису СТС і К на різних рівнях управління. Системний аналіз [84, 146-149] проблеми показує, що розв'язання головного завдання [5, 124, 150] характеризується взаємозалежністю й замкнутістю процедур аналізу й синтезу. У загальному виді побудову автоматизованих СТС і К можна формалізувати у вигляді логічної схеми алгоритму (ЛСА) [151]:

$$S_{\Pi} \overset{1}{\downarrow} \Phi Z. \Phi M. x_1 \overset{1}{\uparrow} A_1 A_2 \overset{2}{\downarrow} A_3. x_2 \overset{2}{\uparrow} A_4. x_3 \overset{2}{\uparrow} \overset{3}{\downarrow} A_5. A_6. x_4 \overset{3}{\uparrow} A_7. S_K, \quad (1.8)$$

де S_{Π} , S_K – оператори початку й кінця ЛСА; ΦM – формулювання мети дослідження; ΦZ – формулювання головного завдання дослідження; A_1 – вибір і розробка системи основних принципів побудови і управління СТС і К; A_2 – проведення систематичних, ергатичних і ергономічних досліджень СТС і К діючого флоту, аналіз результатів дослідження, складання техніко-

ергатичних і ергономічних вимог до перспективних СТС і К; A_3 – розробка (або вибір) вихідної фізичної структури МП АСУ й опис загальних правил функціонування на теоретико-множинному рівні абстрагування; A_4 – аналіз функціональних завдань і виконання контурної декомпозиції МП АСУ; A_5 – вибір і розробка нових способів розв'язання функціональних завдань, розробка відсутніх пристроїв сполучення МП-комплексів (МП-комплектів) з об'єктами управління; A_6 – розв'язання завдань управління, розробка алгоритмічного й програмного забезпечення; A_7 – перевірка алгоритмів методами імітаційного моделювання й експериментування, аналіз результатів; x_1 – умови відповідності мети проблеми; x_2 – умови відповідності обраної системи принципів побудови; x_3 – умови задоволення завдань цілям, вимогам і принципам; x_4 – умови задоволення частковим і загальним принципам ефективності МП-управління СТС і К.

Зрозуміло, що кожному i -му функціональному завданню може бути поставлена у відповідність деяка цільова $\Pi(i)$ функція, що визначає ефективність її розв'язання. Повна сукупність таких приватних функцій відбиває ефективність СТС і К у цілому.

Оскільки значимість окремих цільових функцій у комплексній оцінці ефективності [10, 15, 38] систем не однакова, то узагальнена оцінка може бути побудована шляхом композиції приватних цільових функцій з обліком їх внеску у загальну ефективність E СТС і К [38, 152-156]:

$$E = \sum_{ji}^n P_{ji} \Pi_{ji} ,$$

де P_{ji} – вагові коефіцієнти для кожного з функціональних завдань (загальні для всіх порівнюваних систем), причому P_{ji} і Π_{ji} зв'язані взаємно-однозначною відповідністю.

Отже, при розв'язанні завдань управління СТС і К необхідно використання критеріїв: мінімізації інтенсивності відмов; питомої витрати палива на виробництво електроенергії; часу запуску і часу перехідних процесів; максимізації забезпечення безперебійності електропостачання; швидкодії; охопту параметрів об'єкта функціями контролю й управління; граничної вірогідності

вихідної інформації, необхідної для ухвалення рішення; точності процесів регулювання, ступені автоматизації; мінімізації вартості керування й інших.

Ці суперечливі критерії ускладнюють вибір найкращого критерію, оскільки у більшості випадків ці критерії представляються функціями, що не мають явно виражених екстремумів [103, 106, 107, 121, 157-159].

У зв'язку із цим, для оцінки проєктованих СТС і К, становить інтерес застосування критеріїв технічної корисності [160-162]. У теорії технічної корисності ефективність системи розглядається як апостеріорна оцінка якості системи, а "технічна корисність" є оцінкою якості системи, як засобу для досягнення поставленої мети. Причому, про досягнення якоїсь мети TGT_j , об'єктом OBJ_i судять із деякою ймовірністю P_{ji} . Для досягнення мети потрібний час t_{ji} і ресурси (витрати) EXP_{ji} . При частковому досягненні мети мають місце додаткові втрати (часу й/або інших ресурсів) LOS_{ji} . Отже, можна визначити математичне очікування розміру ресурсів $MEX P_{ji}$, яке буде потрібно, якщо ймовірність досягнення мети TGT_j на інтервалі t_{ji} становить P_{ji} :

$$MEX P_{ji} = EXP_{ji} + LOS_{ji}(1 - P_{ji}).$$

Імовірнісні оцінки P_{ji} визначаються, наприклад, як характеристики надійності (імовірність безвідмовної роботи для часового інтервалу, необхідного для досягнення мети) або шляхом експертного оцінювання [276]. Враховуючи, що $MEX P_{ji}$ визначається як математичне очікування втрат (часових, матеріальних), при об'єднанні декількох об'єктів $OBJ(N_{OBJ})$ для досягнення однієї або декількох цілей $TGT(N_{TGT})$ загальна корисність описується як:

$$|MEX P(N_{OBJ} \times N_{TGT})| = \sum_{ji} MEX P(j,i) |TGT(N_{TGT}),$$

оскільки математичне очікування суми випадкових величин дорівнює сумі їх математичних очікувань. Технічна корисність визначає витрати на досягнення мети, тому, як критерій, повинна мінімізуватися. Особливо ефективним є використання показників технічної корисності для порівняння конкурентоспроможних об'єктів:

$$OBJ(i)|TGT(j) > OBJ(k)|TGT(j) \leftrightarrow MEX P(j,i) < MEX P(k,j), \quad (1.9)$$

де ">" знак переваги. Якщо об'єкти $OBJ(i)$ і $OBJ(k)$ придатні для досягнення мети $TGT(j)$, то важливіший з них той, для якого $MEX P_{ji}$ менший.

Висновки до розділу 1

У розділі проведено загальний аналіз стану і наведені існуючі проблеми розвитку принципів і процесів управління складними СТС і К при їх експлуатації. Визначена необхідність їх вирішення, основні напрямки дослідження та критерії оцінювання результатів.

1. Визначені, засновані на прикладі організації управління СЕЕС та із запиту практики, основні проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективності і існуючі тенденції розвитку складних СТС і К.

2. З аналізу літературних джерел визначені перспективні способи підвищення енергетичної ефективності СЕЕС, визначені необхідні рівні абстрагування математичного опису АСУ СТС і К, принципи оцінювання їх результатуючої ефективності.

3. З аналізу відомих способів підвищення енергетичної ефективності СЕЕС і огляду сучасних джерел інформації висунута гіпотеза дослідження і доведено, що проблеми вдосконалення процесів управління складними СТС і К ефективно вирішуються визначенням конфігурації та структури їх систем управління, при умові застосування сучасних методів синтезу програмно-апаратного забезпечення.

4. Встановлено, що у найбільш загальному виді побудову сучасних складних автоматизованих СТС і К можна формалізувати застосуванням апарату латентно-семантичного аналізу логічних схем алгоритмів.

5. Показано, що існуючі способи комплектації СЕЕС, найчастіше, економічно слабо обґрунтовані і технічно неефективні у ряді експлуатаційних режимів. Визначено, що для оцінки сучасних проєктованих СТС і К, доцільним є застосування критеріїв "технічної корисності" систем.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ І СИНТЕЗУ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ СТС І К

2.1. Визначення методології дослідження СТС і К:

теорія, принципи, методи

Тенденції розвитку складних СТС і К [78-83, 163-166], що проявляються постійним ускладненням їх як об'єктів управління, викликають потребу вдосконалювання їх АСУ. Це здійснено тільки освоєнням нових СТС і К, створенням нових методів управління і пояснюється тим, що ускладнення структури СТС і К приводить до ускладнення всіх їх процесів, створює додаткові складності в управлінні нормальними, передаварійними й аварійними режимами. Вдосконалення АСУ СТС і К вимагає застосування методів кібернетики й засобів цифрової техніки (ЦТ). Інтенсивний розвиток ЦТ (МП-комплексів, міні- і мікроконтролерів) привів до створення нової елементної бази автоматики. На її основі синтезовані уніфіковані суднові керуючі контролери (КК) [167-172], програмне забезпечення (ПЗ) [173-178] і розроблені рекомендації для автоматизації судових об'єктів управління, для різних галузей промисловості.

Досвід побудови і експлуатації МП-систем управління (СУ) у судовій електроенергетиці [27, 29, 37] показує, що застосування методу синтезу, заснованого на зміні елементної бази, з майже механічним перенесенням відомих принципів побудови архітектури МП СУ не приносить відчутного ефекту. Пояснюється це, насамперед, тим, що у створених МП СУ не використані повною мірою "інтелектуальні" [178-184] властивості сучасної елементної бази і ПЗ. Наприклад, такі, як: потужні обчислювальні можливості, структура, що програмно перебудовується, практично необмежена пам'ять, можливості реалізації адаптивного управління, самонастроювання, організації резервування, діагностики [39], тестування й інші. Реалізація перерахованих властивостей МП у СТС і К вимагає створення нової методологічної бази побудови й експлуатації самих СТС і К, адекватної "інтелекту" сучасної елемент-

ної бази і ПЗ. У першу чергу це відноситься до пошуку нових ефективних принципів, способів і методів, які могли б стати теоретичною основою побудови й ефективної експлуатації складних СТС і К.

Мета (підвищення ефективності управління СТС і К за рахунок використання сучасної МП техніки, синтезу оптимальних, з позицій обраних критеріїв, алгоритмів управління), визначає й обмежує коло дослідження і його системні стадії: аналіз, розробка (синтез), випробування (експеримент), оцінка результатів і виділення перспективних напрямків подальших досліджень.

СТС і К відносяться до класу складних людино-машинних (ергатичних) із урахуванням ергономічних принципів управління [74-76, 185-189]) систем, з великою кількістю складних елементів, з детермінованим і імовірнісним характером взаємодії. Можна стверджувати, що сучасні СТС і К повинні мати властивості організованої системи, що проявляється у вигляді функцій збереження й розвитку сукупності вхідних у неї підсистем, функціональних елементів і процесів (управління, регулювання, обслуговування, ремонту).

Для досягнення цих властивостей, у першу чергу, потрібно сформулювати принципи, покладені у основу методології побудови й експлуатації СТС і К, чого можна досягти, спираючись на принципи загальної теорії систем [78-83] і теорії організації систем [190-193]. Досвід розробки, аналіз результатів проведених досліджень, вивчення літератури обґрунтовують необхідність застосування сукупності таких принципів теорії систем, як: зосередження функцій; модульності, лабілізації і актуалізації функцій; апаратурно-програмної надмірності; функціонально-структурної ієрархії; системного аналізу; ергатичного і ергономічного підходів; мультипроцесності; динамічного перерозподілу функцій; "базовості" (уніфікації й агрегування).

На прикладі функціонування автоматизованої СЕЕС розглянемо особливості виділених системних стадій і принципів [80-84, 190, 194].

Принцип зосередження функцій. У СЕЕС зусилля всіх елементів і підсистем на всіх рівнях повинні підпорядковуватися первинній (основній) функції, спрямованій на забезпечення гарантованого електропостачання у нор-

мальних, передаварійних і аварійних режимах, що продиктоване жорсткими вимогами до безпеки мореплавання і вимогами суднових класифікаційних товариств. Цей принцип тісно ув'язаний з такими методологічними властивостями системного підходу, як цілеспрямованість, цілісність, структурна й функціональна стійкість.

Принципи лабілізації і модульності. Необхідно прагнути до створення такої структури СЕЕС, яка сприяє при виробництві й експлуатації гнучкої корекції із заміною ряду функцій, причому без істотної зміни самої структури і витрат на модернізацію. Тому, апаратна частина повинна являти собою сукупність її системостворчих пристроїв у вигляді взаємозамінних модулів. Це впливає на високу ремонтпридатність СТС і К і, як наслідок, підвищує надійність її функціонування, наприклад, за рахунок швидкої заміни несправного модуля на резервний. Ці принципи обумовлюють, також, модульність програмного забезпечення, що досягається виділенням самостійних програмних модулів, інваріантних щодо розміщення їх у пам'яті обчислювального пристрою. Це уможливлює розширення систем управління СТС і К та їх функцій без істотної зміни програмно-апаратного забезпечення.

Принципи актуалізації, безперервного розвитку й нових завдань. У цих принципах є спільність мети, спрямованої на безперервне підвищення технічного вдосконалювання системи, придбання нових властивостей. Потреба у цих властивостях може з'явитися у відповідність із новими вимогами НТП або у процесі експлуатації СТС і К (у міру нагромадження й обробки інформації) з подальшим використанням її на досягнення певного, зазвичай оптимального у деякому сенсі, стану або поведінки системи при початковій невизначеності. Реалізація даного принципу доповнить клас жорстко запропонованих принципом зосередження функцій новими властивостями оптимізації й адаптації до мінливих умов експлуатації, що підвищить економічність і надійність СТС і К у цілому.

Принципи апаратурно-програмної надмірності й динамічного перерозподілу функцій. Ці принципи передбачають таку організацію МП СУ СТС

і К, що при виникненні відмови у апаратурній або програмній частинах ліквідуються за рахунок автоматичної реконфігурації системи й перерозподілу завдань. У цьому випадку резервний, або менш навантажений модуль, бере на себе виконання завдань зруйнованого. Таким чином, зменшується ймовірність відмови СТС і К у цілому. Виконання функцій може відбуватися у неповному обсязі, з гіршими показниками, але при збереженні виконання первинної (глобальної) функції, обумовленої принципом зосередження.

Принцип функціонально-структурної ієрархії. Принцип передбачає для досягнення глобальної цільової функції таку організаційну ієрархію, при якій повинна бути погодженість цілей і координація підсистем нижнього рівня з боку верхнього рівня. Тут істотною є ієрархія прийняття рішень у СТС і К із застосуванням методів адаптації у багатошарових структурах – для компенсації недоліку апріорної інформації про об'єкт управління і навколишнє середовище. Недолік апріорної інформації (у тому числі можливі зміни характеристик об'єкта у процесі експлуатації) може бути подоланий введенням у підсистему спеціального шару адаптації, що змінює стратегію управління СТС і К, наприклад для автоматизованих СЕЕС стратегію регулювання потужності – на підставі аналізу поточної інформації про якість процесів управління у цьому режимі. Реалізація зазначеного принципу викликає необхідність застосування прикладних методів сучасної ТАУ, у тому числі теорії оптимального управління, оцінювання й ідентифікації. У загальному випадку, згідно принципу функціонально-структурної ієрархії, функціональну схему будь-якої СТС і К, наприклад, функціональну схему СЕЕС, можна представити [78, 84, 190-195] так, як показано на рис. 2.1, де позначено: X – сигнали від датчиків; X_{op} – керуючі сигнали від оператора; X_{SLC} , X_{ADP} , X_{DCS} – вхідні сигнали відповідних їм перетворювачів – шару вибору U_{SLC} , шару адаптації U_{ADP} і шару ухвалення рішень U_{DCS} , причому $X = X_{SLC} \cup X_{ADP} \cup X_{DCS}$, Y_{SLC} , Y_{ADP} – виходи відповідних перетворювачів; Y – керуючі впливи.

Перетворювач U_{SLC} визначає стан системи у поточному технологічному циклі і вибирає режим експлуатації (X_{SLC} – Y_{SLC} – алгоритми) відповідно до

принципу зосередження функцій. Далі, U_{ADP} , на підставі дійсних характеристик об'єктів управління і умов роботи СЕЕС у поточному режимі, визначає оптимальні шляхи переходу у наступний режим роботи СЕЕС. Нарешті, U_{DCS} розраховує впливи на ЕЕС, виводить їх на виконавчі органи й контролює їх виконання.

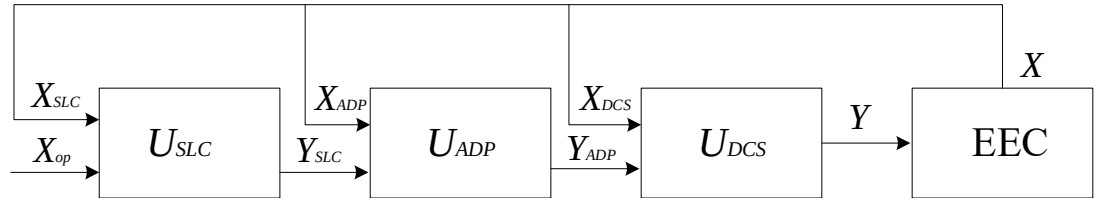


Рис. 2.1. Функціональна схема САЕЕС, що побудована у відповідності до визначеного принципу функціонально-структурної ієрархії

Принцип системного аналізу. Усі стадії створення якісно нових суднових ТС і К на основі сформульованих принципів, повинні ґрунтуватися не стільки на евристичній інтеграції попереднього досвіду розробки й експлуатації СТС і К, скільки на єдиній методології системного підходу, основними положеннями якого є уява про цілісність, поняття зв'язку, структури, ієрархії. Наприклад, конкретна реалізація цих пропозицій стосовно СЕЕС дає можливість представити її як систему S_{CAEES} у вигляді сукупності елементів:

$$S_{CAEES} = S_{ТП} \cup S_y, S_y = S_{cy} \cup S_{фх},$$

де $S_{ТП}$ – елементи технологічного процесу виробництва електроенергії; S_y – елементи системи управління; S_{cy} – елементи технічної частини системи управління; $S_{фх}$ – фахівці, що забезпечують технічну експлуатацію СЕЕС.

При зазначеному підході повинне враховуватися, що S_{cy} й $S_{фх}$ проявляють свої властивості як єдине ціле. Це обумовлює, відповідно до принципу ергатичності, розробку у складі АСУ СТС і К розвитку систему засобів, що забезпечують ефективне сполучення операторів і системи управління. Так, стосовно до СЕЕС, до головних елементів підмножини $S_{ТП}$ відносяться електрогенеруючі системи - ГА:

$$\bigcup_{i=1}^m GA(i) = GA(N_m), i \in N_m, N_m = \overline{1, m}.$$

Кожний ГА включає синхронний генератор $G(i)$, приводний двигун $D(i)$, регулятор $RG(i)$, серводвигун $GM(i)$, генераторний автоматичний вимикач $SWG(i)$, тобто для всієї СЕЕС справедливий такий вираз:

$$GA(N_m) = G(N_m) \cup D(N_m) \cup RG(N_m) \cup GM(N_m) \cup SWG(N_m).$$

У процесі роботи, під впливом зовнішніх або цілеспрямованих впливів, СЕЕС може бути у різних станах:

$$STS(i) \in STS(N_{STS}), \text{ де } i \in N_{STS},$$

де $N_{STS} = \overline{1, r}$ – нумерація станів. Тому, до важливих завдань досліджень СЕЕС, слід віднести конструктивний опис і розпізнавання станів об'єктів.

Будь-який стан можна розглядати як проекцію руху елементів з безлічі $GA(N_m)$ у фіксований $(t, t+1)$ такт часу у n -мірній системі координат, у якій проекцією вектора руху на i -ту вісь є $x(i)$ компонента: $x(i) \in X(N_n), i \in N_n, |N_n| = n$. Таким чином, для одержання n -мірної інформації про рух об'єкта, система повинна бути забезпечена датчиками $TRS(N_n)$ і перетворювачами $CNV(N_n)$ фізичних величин, що перетворюють фізичні сигнали у числові значення $X(N_n)$.

Вкрай важливим у проблемі опису і розпізнавання станів об'єкта управління є завдання встановлення сигнатури, тобто предикатних і функціональних (операційних) імен [78-84, 190-194]. Нехай істинність предикатів

$$\Pi(N_\Pi) = \bigcup_{i=1}^q \prod_i (X(N_n), K(N_k)), |N_\Pi| = q,$$

установлюється шляхом виконання логіко-математичних операцій над $X(N_n)$ і константами $K(N_k)$. Отримана таким шляхом множина $\Pi(N_\Pi)$ буде алфавітом, за допомогою якого, з використанням функціональних імен, можна скласти слова-ознаки, що описують стани об'єктів управління у СТС і К.

Завдання розпізнавання $PRSTS$ стану об'єкта $STS(i)$ зводиться до загальної проблеми розпізнавання рівності для груп. Воно полягає у тому, щоб за завданням усякої групи й пари слів, у алфавіті [109-112] утворюючих цієї групи, визначити, чи рівні ці слова у цій групі, чи ні рівні. Для прикладу,

структуру каналу, що перетворює інформацію стану об'єктів СЕЕС, можна описати так:

$$TRS(N_{\Pi}) \xrightarrow{PRCNV} (X(N_n), K(N_k)) \xrightarrow{PR\Pi} \Pi(N_{\Pi}) \xrightarrow{PRSTS} STS(N_{STS}), \quad (2.1)$$

де $PRCNV$, $PR\Pi$, $PRSTS$ – етапи процесу роботи алгоритму з перетворення CNV інформації, породженню Π предикатів і розпізнаванню $PRSTS$ станів СЕЕС, а множини $X(N_n)$, $K(N_k)$, $\Pi(N_{\Pi})$, $STS(N_{STS})$ є робочим середовищем процесу вирахування й породження предикатів. Вирахування й породження предикатів є категоріями системи управління S_{cy} , яку представимо у вигляді наступних основних компонентів: об'єктно-орієнтований керуючий МП-комплекс (або компонент) – МП; апаратні засоби – АП, необхідні для зв'язку МП із об'єктами СЕЕС (у тому числі й з оператором) і алгоритмічне (програмне) забезпечення – PR [109-112]. Вважаємо, що для кожної із виділених компонент існує таке абстрактне відображення:

$$S_{cy} \xrightarrow{FSTR} STR_{cy},$$

при якому $STR_{cy} = \{STR_{МП}, STR_{АП}, STR_{PR}\}$, де $STR_{МП}$ і $STR_{АП}$ – відображають фізичну, а STR_{PR} – логічну конфігурацію системи управління.

Проблема вибору, розробки й раціонального компонування системи управління S_{cy} СТС і К відноситься до нетривіальних [146-149] і пов'язана, насамперед, із проведенням пошукових досліджень [77, 78] з обліком науково-технічних відкриттів у даній області. Інакше кажучи, виникає завдання PBM оптимізації структури STR_{cy} і складу S_{cy} . Його можна формально представити, як визначення вектору параметрів структури $CHS = (CHS_{GA}, CHS_{МП}, CHS_{АП})$, склад пристроїв системи, зв'язки між ними та векторів способів управління $MC = (MC_1, \dots, MC_k)$, які описують алгоритми розв'язання завдань управління, заданих векторів параметрів завдань $TSK = (TSK_1, \dots, TSK_k)$, які забезпечують максимальні значення критерію ефективності $K = (K_1, \dots, K_m)$, тобто

$$PBM \cong U_{PBM}(CHS, MC, TSK, PR, t) \Rightarrow \max/\min K.$$

Виконаний системний аналіз СТС і К, як об'єкта управління, показує, що для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати завдання, що включає дослідження властивостей розглянутих множин і розробку методів аналізу і синтезу їх елементів. У процесі розв'язання цього, вкрай важливого, головного, завдання виникають комплекси взаємозалежних допоміжних завдань. Розв'язання кожного з них пов'язане із дослідженням, відповідно до мети завдання абстрактної моделі СТС і К. Для досягнення максимально-можливої повноти інформації, дослідження будемо проводити на різних рівнях абстрагування [82, 83].

Принцип ергатичності і ергономічності. У СТС і К повинні бути враховані можливості й обмеження, властиві людині. Якщо це не враховано, то функціонування СТС і К погіршується і устаткування може не виконати свого призначення. При дослідженні більшості СТС і К їх необхідно розглядати як системну єдність (людина – машина) спеціальної організації й специфічних процесів діяльності, завдяки яким виконуються всі інші принципи. Крім того, завдяки досвіду експлуатації, удосконалюванню навичок і знань фахівців, що безупинно накопичуються, їх потенціал, пізнавальні й прикладні можливості реалізуються у сукупність внутрішньо-наукових, економічних і загальносоціальних ефектів. Реалізація принципу ергатичності тісно пов'язана з безперервною підготовкою й підвищенням кваліфікації суднових фахівців з використанням тренажерів і імітаційних моделей окремих СТС і К.

Застосування тренажерів [27, 29, 37], математичних [195-198] і фізичних моделей окремих СТС і К дозволяє прищепити навички ефективної експлуатації нової техніки, визначити напрямки їх удосконалення.

У цьому зв'язку, науково-обґрунтована методологічна база побудови і експлуатації різних за призначенням складних СТС і К повинна бути універсальною - з метою подальшої її реалізації у виробництві, використанні при модернізації існуючих суден, при навчанні і перепідготовці кадрів морського флоту (застосуванням у тренажерах і імітаційних моделях суднових систем та устаткування різного типу і складу).

2.2. Методологія і принципи побудови алгоритмів управління, ергатичного і ергономічного аналізу та оцінювання ефективності експлуатації СТС і К

2.2.1. Пропонується наступний, ілюстрований прикладом на основі СЕЕС, алгоритм синтезу систем управління складними СТС і К.

Перший крок починається з розв'язання завдань, пов'язаних з визначенням архітектури АСУ ТС і К. Так, для СЕЕС [199-200], необхідне встановлення основних принципів взаємодії з АСУ та визначення особливостей обміну інформацією між частинами системи (підсистемами, апаратурою і т. ін.).

Другий крок. Після синтезу архітектури АСУ (з необхідним урахуванням надійності функціонування [201-203], можливостей резервування), функціонування кожної підсистеми і пристрою описується формальною мовою (знакових систем, [109-112]). Зв'язок між елементами АСУ здійснюється за допомогою загальних змінних значень, що зіставляються з наборами сигналів на вхідних і вихідних каналах пристроїв (блоків).

Третій крок. Формування отриманої сукупності описів пристроїв формальною мовою знакових систем і описів зв'язків між ними, дозволяє визначити алгоритмічну структуру СТС і К (наприклад, для АСУ СЕЕС), яка є вихідним об'єктом для досліджень і подальшої оптимізації.

2.2.2. Відомо, що ергатичний і ергономічний аналіз досліджують проблеми взаємодії людини й машини з метою визначення оптимальної комбінації змістовної (людської) і технічної сторін керуючої діяльності та з урахуванням обраних критеріїв. Ці проблеми взаємодії фокусуються навколо процесу послідовної передачі традиційно виконуваних людиною функцій машині й характеризуються поступовим нарощуванням людино-машинного інтелектуального потенціалу. Організація взаємодії всіх рівнів процесу управління означає організацію ефективної роботи людини і нової техніки. Ключове питання полягає у розподілі й узгодженні функцій людини й машини. Питання виникає і як передумова завдання головних напрямків розвитку судно-

вих технічних засобів автоматизації, і як умова, що визначає вигляд проектованої АСУ, і як фактор оцінки вже створених технічних засобів.

Ця проблема залишається центральним теоретичним і практичним завданням забезпечення ефективності функціонування СЕЕС на всіх рівнях її організації. Слід зазначити, що математичний апарат, який дозволяє визначити оптимальні рішення у СЕЕС, як у ергатичній системі, ще не створений. Слід вважати, що завдання проектування СЕЕС зводиться до розгляду і порівняння різних варіантів реалізації й вибору серед них найкращого. При цьому велике значення має аналіз систем-аналогів СЕЕС сучасних суден.

Оцінка кількісних і якісних показників систем-аналогів, що характеризують їхні технічні рівні, звичайно, проводиться за допомогою галузевих і державних стандартів [34, 35], що передбачають складання карти технічного рівня (КТР, [205]) на базі функціонально-самостійних операцій (ФСО) [202, 206]. Під ФСО розуміється сукупність елементарних операцій (з урахуванням надійності) з формування, обробки командних і інформаційних сигналів, їх передачі до виконавчих органів, або до засобів відображення інформації.

Головним недоліком методу оцінки систем-аналогів з використанням КТР є труднощі встановлення чисельних значень ряду показників, особливо, для систем закордонного виробництва, для яких з комерційних міркувань деякі параметри неінформативні або зовсім не приводяться.

У зв'язку із цим виникає необхідність у розробці додаткових способів оцінки систем-аналогів. Одним з можливих шляхів розв'язання завдання є порівняння систем-аналогів з якоюсь гіпотетичною системою, обсяг автоматизації якої VAH представляється як об'єднання функцій усіх систем-аналогів $\bigcup_{i=1}^n VAH(i)$ [207, 208]. Повнота оцінки досягається введенням вагових коефіцієнтів елементарних функцій ФСО. Для одержання ваг застосуємо принцип адитивної корисності [209] з використанням економетричних методів (експертних оцінок) [77, 78, 210]. Для цієї мети експерт заповнює таблицю, попарно порівнюючи значимості ФСО, проставляючи у клітці порівняння двох ФСО

номер тієї з них, яка має більшу, на його думку, значимість. У тих випадках, коли експерт не розрізняє значимості, у клітку записуються обидва номери. У такому випадку вага значимості j -ї ФСО $VL(j)$ визначається як:

$$VL(j) = \frac{\sum_{k=1}^m Q(j,k)}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m Q(j,k)}; Q(j,k) = 1 + Q'(j,k) + Q''(j,k),$$

де $Q(j,k)$ – число переваг j -ї ФСО; $Q'(j,k)$ і $Q''(j,k)$ – кількість помітних і нерозрізнених переваг j -ї ФСО k -м експертом; m – загальна кількість експертів; n – кількість ФСО.

Інтегральний ваговий коефіцієнт [210] функціональної повноти системи-аналога, порівнюваної з гіпотетичним, розраховуємо за формулою:

$$\frac{N_{\text{ФСО}}^S}{N_{\text{ФСО}}^H} \cdot \frac{N_l^S}{N_l^H} \cdot \frac{v^S}{v^H},$$

де $N_{\text{ФСО}}^S$ й $N_{\text{ФСО}}^H$ – кількість ФСО порівнюваної й гіпотетичної системи, відповідно; N_l^S і N_l^H – число елементарних функцій порівнюваної та гіпотетичної системи; v^S і v^H – зведені ваги обсягу автоматизації.

Після обрання варіантів реалізації системи, слід оцінити ефективність ухвалених рішень. Для цього також необхідні спеціальні методи.

Так, суднові фахівці здійснюють свою трудову діяльність у ролі операторів, ергатичного резерву і ремонтного персоналу. Основними функціями оператора при управлінні СЕЕС є: одержання й обробка інформації; виявлення несправностей і їх діагностика [39]; спостереження, контроль і управління енергоресурсами. Діяльність оператора особливо ускладнюється у пульсивних установках із ВГ, підстерновими пристроями та автономними ДГ (див. § 1.2). У зв'язку із цим, до оператора пред'являються високі вимоги відносно уваги, пам'яті, тактичного й стратегічного мислення, реакції. Важливе значення набувають готовність до реагування на несподівані аварійні ситуації в умовах монотонності, глибоке знання устаткування, уміння й навички у налагодженні, пошуку й усуненні несправностей.

Без аналізу трудового процесу у ЛМС не існує наукової ергатики та ергономіки і, що впливає із їх визначення – дослідження трудового процесу, як взаємозв'язку людини і машини. Широкий діапазон трудової діяльності суднових фахівців з експлуатації СЕЕС (оператор, ергатичний резерв, ремонтний персонал) вимагає для проведення ергономічно-ергатичних досліджень застосування різних методів. Так, для дослідження праці електрогрупи судноремонту, доцільно використовувати методи, засновані на аналізі статистичних даних, експертних оцінок і натурних спостережень із застосуванням хронометрування. Для дослідження процесів оперативного управління СЕЕС у нормальних і аварійних ситуаціях ефективним є метод моделювання, що дозволяє формалізувати блоки алгоритмів і кількісні показники СЕЕС як ЛМС.

Поповнення судноплавних компаній новими суднами, ставить перед науковцями і експлуатаційниками завдання з вдосконалення методів розробки типових штатів екіпажів, нових форм організації праці і відпочинку плавскладу. Для розв'язання цих завдань необхідні точні дані про бюджет робочого часу суднових фахівців, визначення якого ґрунтується на детальному дослідженні трудових процесів у натурних умовах. Для дослідження процесів оперативного управління СЕЕС ефективним є опис діяльності оператора за допомогою алгоритмів, що дозволяють отримати ряд кількісних показників. Сутність цього методу зводиться до розв'язання наступних завдань: а) визначення переліку ситуацій, де потрібна участь оператора у процесах управління; б) алгоритмізація діяльності оператора у кожній ситуації; в) розрахунки кількісних показників; д) оцінка ефективності й видача рекомендацій з подальшого вдосконалювання СЕЕС.

Початковим моментом кожної ситуації є поява певного сигналу, якими можуть бути: ознаки відхилень параметрів за встановлені межі; дані про зміни станів механізмів і виконавчих органів; настання моментів часу, регламентованих інструкціями для виконання певних операцій.

Пропонується певний порядок формування переліку ситуацій, здійснюється перегляд усіх представлених на пульті інформаційних приладів і орга-

нів управління. Щоразу визначається, чи може даний сигнал або орган управління першим бути використаний, при вирішенні оператором конкретного завдання. Якщо - "Може", тоді здійснюється включення даної ситуації у перелік; якщо - "Ні", тоді перевіряється, чи не пропущена ситуація, у якій сигнал використовується у якості проміжного.

Наступним етапом є алгоритмізація діяльності оператора у кожній виділеній ситуації. Для формалізації можна використовувати автоматні мови [211, 212] – графічні, логічні, матричні схеми алгоритмів (ГСА, ЛСА, МСА) або мережеві графи. Найбільш зручною [212] мовою є ЛСА, що забезпечує компактний запис при збереженні всієї повноти інформативності. Формалізація алгоритмів діяльності оператора (АДО) мовою ЛСА здійснюється за допомогою послідовного символічного запису елементарних дій (операторів) – моторних, сенсорних і логічних. У загальному випадку, функціонування САЕЕС за участю людини-оператора, можна представити у вигляді результатної функції:

$$F_{MAN}(X(N_{CND})) \cong U_{CND}(ALG, X_{CND}) \rightarrow \{MTR(N_M), SNS(N_S), LG(N_L)\},$$

де F_{MAN} – тезаурус; $X(N_{CND})$ – безліч сигналів, що описують ситуацію; $MTR(N_M)$, $SNS(N_S)$, $LG(N_L)$ – безлічі моторних, сенсорних, логічних елементарних дій, породжуваних у процесі діяльності оператора; N_{CND} , N_M , N_S , N_L – нумерація елементів безлічей.

Алгоритмічний опис дозволяє одержати ряд об'єктивних показників [211-213]. Основні такі: загальна кількість членів алгоритму ($|N_A|$), кількість моторних ($|N_M|$), сенсорних ($|N_S|$), логічних ($|N_L|$) операторів і їх відносні (N') величини; математичне очікування часу взаємодії оператора із системою у кожній конкретній $CND(i)$ ситуації – $M(t_{CND}(i))$; імовірність появи ситуації $P_{CND}(i)$; ступінь її невизначеності $H_{CND}(i)$; нормований коефіцієнт стереотипності Z_H ; нормований коефіцієнт логічної складності алгоритму L_H .

Загальна кількість членів алгоритму $|N_A| = |N_M| + |N_S| + |N_L|$ визначає абсолютне завантаження оператора. Математичне очікування часу взаємодії оператора із системою управління характеризує, з урахуванням кількості

членів алгоритму, інтенсивність завантаження оператора і його швидкодії у системі. Математичне очікування визначаємо як суму математичних очікувань $m_j(t_j)$ правильного виконання елементарних операторів алгоритму

$$M(t_{CND}(i)) = \sum_{j=1}^n m_j(t_j) \quad (2.1)$$

де $n = |N_A|$ для i -ї ситуації.

Величини $m_j(t_j)$ одержують на підставі обробки експериментальних досліджень у суднових і лабораторних умовах. Ступінь невизначеності очікування у реалізації кожного алгоритму характеризує ступінь готовності оператора до діяльності по даному алгоритму. Кількісно цю величину можна охарактеризувати характеристикою ентропії:

$$\bar{H}_\omega = \sum_{\omega=1}^n P_\omega \log_2 P_\omega, \quad (2.2)$$

де P_ω – імовірність появи ω -й ситуації.

Відомо [214, 215], що оптимальне завантаження оператора перебуває у області $H_\omega = 0,53$. Визначимо для цієї зони ймовірність появи $P_\omega = \frac{1}{l} 0,369$ ситуації. Для оцінки логічної складності і стереотипності алгоритмів нормуємо коефіцієнти L_H і Z_H , розраховуючи їх:

$$\begin{aligned} m_0 &= m_C + m_M; n_0 = n_C + n_M \\ L_H &= \frac{m_L}{m} \sum_{j=1}^{g_L} \frac{n_L^2(j)}{n(j)}; Z_H = \frac{m_0}{m} \sum_{j=1}^{g_0} \frac{n_0^2(j)}{n(j)}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

де m_L, m_C, m_M – кількість логічних, сенсорних і моторних операторів у алгоритмі; m – загальна кількість операторів в алгоритмі; n_L, n_C, n_M – кількість логічних, сенсорних, моторних операторів в j -й групі алгоритму; n – загальна кількість операторів в j -й групі; g_L, g_0 – кількість груп у алгоритмі.

Однак, нормованих показників L_H і Z_H буває недостатньо для оцінки АСУ, що характеризуються порівняно малою ймовірністю ситуацій, а, отже, великим ступенем невизначеності очікування, що приводить до зниження готовності оператора [215], втраті навичок, придбаних їм у процесі підготовки.

У той же час, інформаційні моделі АСУ ЕЕС характеризуються великою щільністю й широким полем просторового розподілу елементів (панелі ГРЩ, локальні пульти, ЦПУ і т.д.). У цих умовах операторові, при виконанні моторних дій, з метою забезпечення їх надійності, доводиться знижувати їх динамічну інтенсивність, нарощуючи сенсорну й логічну інтенсивність. Тому уведемо додатковий показник – нормативний коефіцієнт складності переробки інформації

$$S_H = \frac{m_s}{m} \sum_{j=1}^{g_s} \frac{n_s^2(j)}{n(j)}, \quad (2.4)$$

де $m_s = m_C + m_L$; $n_s = n_C + n_H$.

Граничними значеннями S_H , встановленими експериментально та з погляду функціональної надійності, можна вважати $S_H \leq 0,3$. При оцінці ергатичних систем [74, 76, 186-189] застосуємо інтегральну характеристику:

$$E = \frac{\gamma_1 \sum_{i=1}^l P(i) + \gamma_2 \sum_{i=1}^m P(i) + \dots + \gamma_n \sum_{i=1}^k P(i)}{\gamma_1 l + \gamma_2 m + \dots + \gamma_n k} \quad (2.5)$$

де $P(i)$ – імовірність розв'язання оператором завдання, причому $P(i) = P_1(i) \cdot P_2(i)$, де $P_1(i)$ – імовірність безпомилкового виконання людиною певної операції, $P_2(i)$ – імовірність розв'язання завдання протягом часу, що не перевищує задане; $\gamma(j)$, $j \in \overline{1, n}$ вагові коефіцієнти, що враховують важливість окремих груп завдань; l, m, k – числа завдань, віднесених до різних груп.

Вираз (2.5) дозволяє оцінити ефективність здійснюваного оператором процесу управління стосовно до всієї сукупності завдань. Аналогічно (2.5), оцінку ефективності окремих операцій процесу управління, визначимо як

$$E_m = \frac{\gamma_1 \sum_{i=1}^{l_m} P_m(i) + \gamma_2 \sum_{i=1}^{m_m} P_m(i) + \dots + \gamma_n \sum_{i=1}^{k_m} P_m(i)}{\gamma_1 l_m + \gamma_2 m_m + \dots + \gamma_n k_m}, \quad (2.6)$$

де $P_m(i)$ – імовірність безпомилкового виконання певної операції у конкретному завданні; l_m, m_m, k_m – число операцій розглянутого типу завдань, віднесених до окремих груп; m – індекс типу операції.

Якщо в оцінці ефективності ЛМС урахувати також показник надійності техніки, то ймовірність розв'язання завдання за час t може бути визначена як:

$$P_{\text{ЛМС}}(i) = P_{\text{мх}}(i) + (1 - P_{\text{мх}}(i))\bar{H}_{\omega}(P(i) + (1 - P(i))P_{\text{вип}}(1)) \quad (2.7)$$

де $P_{\text{тх}}(i)$ – ймовірність безвідмовної роботи техніки; $P_{\text{вип}}(i)$ – ймовірність виправлення оператором своїх помилок; $\bar{H}_{\omega}$ – область оптимального завантаження оператора.

Застосовуючи спосіб єдиної інтегральної характеристики (2.5) для оцінки ЛМС, одержимо:

$$E_{\text{ЛМС}} = \frac{\gamma_1 \sum_{l=1}^l P_{\text{ЛМС}}(i) + \gamma_2 \sum_{m=1}^m P_{\text{ЛМС}}(i) + \dots + \gamma_n \sum_{k=1}^k P_{\text{ЛМС}}(i)}{\gamma_1 l + \gamma_2 m + \dots + \gamma_n k} \quad (2.8)$$

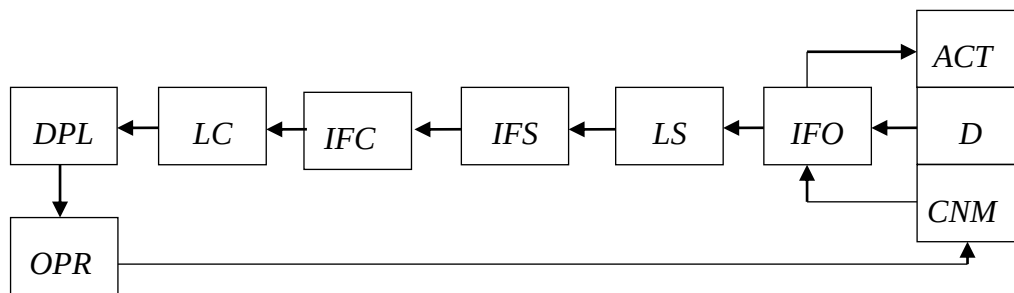


Рис. 2.2. Структура нерезервованої розподіленої МП-системи

Значення $P_{\text{тх}}(i)$ визначаються як ймовірність безвідмовної роботи технічних пристроїв, задіяних у розв'язанні i -го завдання. Наприклад, для нерезервованої розподіленої МП-системи, що містить (рис. 2.2): дисплей DPL , локальний координатор LC , інтерфейс зв'язку координатора зі сполучною шиною IFC , інтерфейс зв'язку локальної підсистеми зі сполучною шиною IFS , локальну підсистему LS , інтерфейс зв'язку об'єкта з локальною підсистемою IFO , датчики D , органи управління CNM , виконавчі органи ACT , одержимо:

$$P_{\text{тхo}}(i, t) = P_D(i, t_a) \cdot P_{\text{CNM}}(i, t_a) \cdot P_{\text{IFO}}(\dots) \cdot P_{\text{LS}}(\dots) \cdot P_{\text{IFS}}(\dots) \cdot P_{\text{LC}}(\dots) \cdot P_{\text{DPL}}(\dots) \cdot P_{\text{ACT}}(i, t_a). \quad (2.9)$$

Якщо система містить резервний канал управління з ймовірністю безвідмовної роботи $P_{\text{тхр}}(i, t_a)$, то загальна надійність $P_{\text{тхор}}$ технічних засобів у реалізації i -го завдання за час t підвищиться і буде визначатися вираженням:

$$P_{\text{тхор}} = P_{\text{тхо}}(i, t) + P_{\text{тхр}}(i, t) - P_{\text{тхо}}(i, t) \cdot P_{\text{тхр}}(i, t) \quad (2.10)$$

Тут час t розглядаємо як припустимий час переведення системи з поточного стану у запропонований, згідно ситуації. Він складається із часу дії людини $t_{\text{л}}$ і техніки $t_{\text{тх}}$. Обмеження за швидкодією передбачає дотримання нерівності: $t_{\text{л}}(i) + t_{\text{тх}}(i) < t(i)$.

Тому надійність людини, як і техніки, характеризуємо не тільки ймовірністю безпомилкового виконання операцій, але й своєчасним функціонуванням (імовірність своєчасного виправлення помилки).

Фактичне зниження ефективності $\Delta E_{\text{пом}}$ системи за рахунок помилок оператора можна визначити за формулою: $\Delta E_{\text{пом}} = 1 - t_{\phi} / t_{\text{пом}}$, де t_{ϕ} – час перекладу системи з фактичного у заданий стан при безпомилковій роботі оператора, а $t_{\text{пом}}$ – з урахуванням витрат часу на виправлення помилок, причому $t_{\text{пом}} = \sum_{j=1}^n t(j) P_{\text{пом}}(j)$, де $t(j)$ – час виправлення j -ї помилки; n – число помилок; $P_{\text{пом}}(j)$ – імовірність j -ї помилки.

Надійність дії оператора суттєво залежить від його психологічної напруженості, пов'язаної з відповідальністю й дефіцитом часу на ухвалення рішення і його виконання. Час τ , протягом якого після виникнення ситуації не відбувається зміни вихідної характеристики оператора, будемо називати латентним періодом. Цей час витрачається на приймання інформації, її обробку, вироблення рішення й передачу його виконавчим органам. Він буде залежати від складності ситуації, кількості інформації, щільності її й просторового розміщення. Особливої уваги вимагає поведінка оператора у аварійних ситуаціях, коли переробка інформації здійснюється автоматично на основі умовно-рефлекторних зв'язків. Відсутність таких зв'язків приводить до перекидання автоматичного пошуку розв'язання до області безумовних рефлексів, тобто відкрита діяльність стає інстинктивною, має місце імпульсивна поведінка, коли емоції є командним сигналом для здійснення дії [74-76, 186-189].

Тому важливим завданням є зниження психофізіологічної напруженості оператора на часовому інтервалі τ . Добитися цього можна шляхом більш

кваліфікованого навчання оператора, а також збільшенням резерву часу на ухвалення рішення. У експериментальних дослідженнях здобувача, результати яких отримані за допомогою багаточисленних робіт з курсантами на тренажерах САЕЕС [27, 29, 37] встановлено, що залежність оператора $Z(t_p)$ від резерву часу виражається експонентним законом: $C(t_p) = e^{-\lambda t_p}$, де $\lambda = 1/\tau_{p.ср}$, а $\tau_{p.ср}$ – середній резервний час. У практичних розрахунках для визначення $P(i)$ можна скористатися апроксимованими залежностями, отриманими шляхом обробки статистичних даних для ситуацій і для режиму діяльності оператора з попередньою активізацією. Отриманий показник надійності використається як остаточний результат, або входить у сукупність кількісних показників, що характеризують ефективність ергатичної системи і отриманих у процесі розв'язання перерахованих вище завдань дослідження процесів оперативного управління САЕЕС.

2.3. Методологія побудови розподілених ієрархічних АСУ СТС і К

При формулюванні мети і завдань дослідження, відзначена проблема опису функціонування складних технічних систем управління. Було підкреслено, що для досягнення одержання максимально можливої повноти інформації й повного розуміння розв'язуваної проблеми, опис функцій управління доводиться проводити на різних рівнях абстракції.

До вищого рівня віднесемо лінгвістичний рівень опису, який представлений у вигляді діючих нормативних документів, вимог, отриманих у результаті проведення ергономічно-ергатичних досліджень, експертних оцінок і, нарешті, рекомендацій експлуатаційників, наділених професійними знаннями. У остаточному підсумку, ці матеріали є основою для розробки технічного завдання на проектування ієрархічної АСУ СТС і К [81-84].

Наступний рівень зв'яжемо з верифікацією завдання за допомогою формальних методів опису систем. На цьому етапі проводиться семантична пе-

переробка інформації, здійснюється специфікація завдань і опис їх на рівні концептуальних моделей: методів теоретико-множинного опису [216-218], методів апарату семантичних мереж [219-222], фреймів [109, 132, 223-227], мереж Петрі [228, 229], логічного програмування [230, 231] та ін.

Семантична переробка інформації дозволяє створити формалізовану базу знань, якою системний аналітик може обмінюватися як із програмістом, так і із замовником (майбутнім користувачем), уточнюючи й удосконалюючи семантичні моделі. Залучення користувача до процесів розв'язання завдань переслідує відразу дві мети, перша – це уточнення моделей на стадії розробки, а друга, більш важлива – підготовка фахівців в області супроводу бази знань і програмного забезпечення (ПЗ). Пов'язане це з тим, що в процесі експлуатації можуть виникнути зміни постановки завдань управління, вимог до їхнього розв'язання, або, наприклад, відповідно до прийнятих принципів актуалізації й лабілізації може з'явитися необхідність розширення функціональних можливостей системи, адаптації її до мінливих умов конкретного застосування. Іншими словами супровід бази знань прикладної програмувальної системи виконується протягом усього її життєвого циклу. ,

Такий підхід можна реалізувати на базі технології, ідея якої полягає у тому, щоб розглядати систему понять предметної області й відповідність між нею й системою понять формальної моделі, як вихідну інформацію для розв'язання прикладних завдань. Подібний підхід повинен забезпечити користувачеві можливість самостійної зміни системи понять предметної області, визначення нових понять через відомі системи.

При новій технології користувачі повинні бути забезпечені адекватною формою надання всіх видів інформації – текстів природньою мовою, графів, таблиць, графіків, рукописних символів, математичних виражень, а також інших форм надання інформації на професійних діалектах системного аналітика й програміста.

Частина знань, яка протягом експлуатації системи може мінятися користувачем, віднесемо до декларативної, а незмінну – до процедурної частини.

У зв'язку із цим, мова викладення знань повинна забезпечувати можливість надання не тільки формального запису необхідних знань, але й маніпулювання цими записами. При цьому для будь-якого методу викладення знань природно виділяються основні операції, з яких при необхідності можуть формуватися більш складні процедури.

У групі декларативних методів викладення знань особливо виділяються логічні й засновані на апараті семантичних мереж, а також мови опису дискретних автоматів [232, 233].

У класифікації мов опису й виділяється чотири ієрархічно зв'язані групи мов: первинні, базові, автоматні й вихідні мови. Однак наведена класифікація носить умовний характер і не відбиває всієї глибини відмінностей, подібностей й можливостей мов. Вона лише характеризує деякі їхні особливості, за допомогою яких можна окреслити сферу їх використання. Навряд можна вважати доцільною спробу більш точно класифікувати мови, оскільки практика їх застосування показує, що фактично будь-яка мова (або сукупність їх) може ефективно використовуватись на кожному рівні опису. Вибір визначається, у основному, розв'язуванням завдань і навичками системного аналітика. У теорії й практиці побудови баз знань суднових систем управління найчастіше виникає потреба у інтеграції методів і у використанні їх переваг і компенсацією недоліків.

З метою синтезу об'єктно-орієнтованого програмного (ООП) продукту, нами пропонується інтеграція трьох способів опису: орієнтованих графів [234, 235], булевих [236, 237] і результатних функцій [238, 239]. Такий підхід дозволив реалізувати не тільки процедурні методи викладення знань, засновані на семантичних мережах [219-222] (орієнтованих графах), але й логічні. Більше того, оскільки логічні твердження (формули) розглядаються при такому підході як об'єкти, з'являється можливість класифікації й структурування наборів формул, що, принаймні, частково компенсує недоліки логічних методів викладення знань.

Сутність пропонованого методу зводиться до наступного.

На першому етапі верифікації завдання ефективно застосування орієнтованого графа, який дозволяє наочно й компактно відобразити сукупність станів об'єкта й переходів між станами. Однак сам по собі граф автомата містить слабо розвинену синтаксичну структуру, що ускладнює перевірку семантичної коректності (повноти й несуперечності) формалізації завдання. Зазначений недолік усувається застосуванням систем булевих функцій (функторів [240]) для опису сукупності ознак станів об'єкту й умов переходу.

Граф містить сукупність пронумерованих вершин $S(N_{STS}) = \bigcup^n S(i), i \in N_{STS}, |N_S| = n$, і незаборонених переходів між ними з безлічі $JMP(N_S \times N_S) = \bigcup_{i,j}^{nn}, i \in N_{STS}, j \in N_{STS}$.

Простий функтор у загальному випадку описується системою:

$$\begin{aligned} V_a(t+1) &:= f_a(x_1(t+1), \dots, x_m(t+1), V_1(t), \dots, V_g(t), y_1(t), \dots, y_p(t)); \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \\ V_i(t+1) &:= f_i(x_1(t+1), \dots, x_m(t+1), V_g(t), y_1(t), \dots, y_p(t)); \\ y_i(t+1) &:= f_j(x_1(t+1), \dots, x_m(t+1), \dots, V_g(t), y_1(t), \dots, y_p(t)); \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \\ y_r(t+1) &:= f_r(x_1(t+1), \dots, x_m(t+1), \dots, V_g(t), y_1(t), \dots, y_p(t)), \end{aligned} \quad (2.11)$$

де $(V_a, \dots, V_i; V_1, \dots, V_g) \subseteq V, (y_j, \dots, y_r; y_1, \dots, y_p) \subseteq Z$, а функції $f_a, \dots, f_r \in$ булевими; змінні $x_1, \dots, x_m; V_1, \dots, V_g; y_1, \dots, y_p$ – вхідними, а $V_a, \dots, V_i; y_i, \dots, y_r$ – вихідними функторними змінними.

Складний функтор описується сукупністю виражень:

$$\begin{aligned} V_a(t+1), \dots, V_i(t+1), y_i(t+1), \dots, y_r(t+1) &:= F_A(x_1(t+1), \dots, x_m(t+1), \\ V_1(t), \dots, V_g(t), y_1(t), \dots, y_p(t)); \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \\ V_a(t+1), \dots, V_i(t+1), y_i(t+1), \dots, y_r(t+1) &:= F_T(x_1(t+1), \dots, x_m(t+1), \\ V_1(t), \dots, V_g(t), y_1(t), \dots, y_p(t)), \end{aligned} \quad (2.12)$$

а складний предикат сукупністю:

$$\begin{aligned} &F_A(x_1(t+1), \dots, x_m(t+1), V_1(t), \dots, V_g(t), y_1(t), \dots, y_p(t)); \\ &F_T(x_1(t+1), \dots, x_m(t+1), V_1(t), \dots, V_g(t), y_1(t), \dots, y_p(t)), \end{aligned} \quad (2.13)$$

у яких кожна $F_A, \dots, F_T \in$ або булева функція, або їй відповідає деяка апаратна схема з пам'яттю із входніми й вихідними змінними $x_{\overline{1,m}}, V_{\overline{1,g}}, y_{\overline{1,p}}; V_a, \dots, V_j; y_{\overline{j,a}}$ (останні у випадку предиката відсутні).

Вираження, що входять у сукупності (2.11-2.13), дають можливість скласти несуперечливу систему еталонних ознак $SIGN(P(N_{STS}))$ станів об'єкта й переходів $SIGN(P(N_{STS} \times N_{STS}))$ шляхом відбору потрібних і реальних кодів комбінацій значень змінних X і V з урахуванням такої вимоги, як мінімум довжини слова ознаки при умовах достатності й несуперечності. Несуперечність перевіряється попарним порівнянням слів ознак, а протиріччя усуваються до визначенням з наявного числа змінних і предикатів, або, якщо не вдається, то введенням нових, додаткових змінних.

Тут навмисно підмінене поняття "набір ознак стану" терміном "слово ознаки стану" з тою метою, щоб розглядати це поняття як конструктивний об'єкт, оскільки "слово" зв'язане не тільки з алфавітом (набором предикатів), але й із заданою внутрішньою системою координат (нормальним алгоритмом/алгорифмом за Марковим). Таким чином, опису еталонних слів ознак торкається також завдання синтезу класу словникових алгоритмів.

Завдання структурування алгоритмів розв'язується, поставивши у однозначну відповідність систему функціональних алгоритмів $ALG(N_{STS})$ зі сукупністю станів об'єкту $SIGN(S(N_S))$. При цьому завдання нумерації алгоритмів розв'язується, зв'язавши стан об'єкту й обчислювальний алгоритм властивістю для моделі, яке полягає у тому, що програму, відповідну $F(i)$, можна ефективно знайти за i , оскільки $F(i)$ можна задати параметрично $F_i(x_i) = F_i(<i, x>)$, $i \in N_S$, де N_S – безліч, тому $F_i(<i, x>) \cong U(D(i), x)$, тобто досить побрати у якості алгоритм D , який у застосуванні до i просто видає програму $X - Y$ алгоритму: "утворюй пари $<i, x>$ і застосуй до неї алгоритм, що обчислює результатну функцію U ".

У частині організації функціонування центральної (керуючої) "програми – диспетчер" (ПД) уведемо таку умову, при якій ПД у кожному новому $(t+1)$ -му такті починає роботу з найбільш імовірного вихідного алгоритму. Це дозволяє відійти від традиційного методу пошуку дійсного стану, заснованого на переборі безлічі функцій порівняння, завжди у одній і тій же послідовності, починаючи з того самого стану, незалежно від передісторії.

На відміну від традиційного підходу пропонується у якості початкового стану прийняти останній, як найбільш імовірний, зареєстрований стан $STS(i)$, i -й номер якого вказує на номер вихідного алгоритму ПД. Якщо результат порівняння дає неправильний предикат $R_{STS}(i) \neq I \cong \overline{R_{STS}(i)}$ то наступна адреса обігу ставиться у відповідність номеру j найбільш імовірного стану $STS(j)$, у який змогла б перейти система з $STS(i)$ і т.д. до визначення дійсного стану або доти, поки не будуть вичерпані всі обрані жереби.

При невдалих результатах, для підвищення надійності ПД, необхідно передбачити адресу переходу $ADR(CS)$ до детермінованого алгоритму $PR(CS)$, як резервного. Якщо ж і $PR(CS)$ не дає результату, то алгоритм закінчується звертанням до оператора (DOP). Якщо зазначену процедуру аналізу й оцінки позначити певною функцією $A(DT, PR, t)$, аргументами якої є вихідні дані DT , локальні дії над ними PR і основний програмний такт t , а правила закінчення процедури предикатом $\Pi(A(DT, PR, t))$, то кожен порівняння можна відобразити результатною функцією:

$$RF(JMP(i - j)) \cong A(DT, PR, t) \rightarrow \Pi(A(DT, PR, t)), \quad (2.14)$$

де у загальному випадку $DT = X \cup Y$.

Таким чином, ПД реєструє перехід системи у новий $S(j)$ стан, якщо результат застосування логічних операцій PR над вихідними даними DT дає дійсне значення. При цьому реєстрація нового стану і інші правила закінчення функціонування відображаються у вигляді предиката $\Pi(A(DT, PR, t))$.

На підставі викладеного, запишемо математичну модель запропонованого способу організації функціонування ПД у загальному виді.

Нехай $i \in N_{STS}$ – номер вихідного стану; $N_P \{j, \dots, \alpha, \dots, \beta\}$ – група номерів станів, відібраних жеребкуванням і впорядкованих за ступенем убуття математичного очікування; M_{NP} – перехід з i -го стану у одне з N_P , тобто $M_{NP} \{M_{ij}, \dots, M_{i\alpha}, \dots, M_{i\beta}\}$. Нехай також $ADR(N_P) = \{ADR(j), \dots, ADR(\beta)\}$ – група предикатів, з якої істинність кожного може бути встановлена тільки у тому випадку, якщо аналіз поточного стану здійснюється відповідно до результатної функції, порядковий номер якої збігається з номером предиката, тобто $|ADR(N_P)| = |RF(N_P)|$.

З урахуванням умови (2.14), а також прийнятих позначень одержимо:

$$\begin{aligned}
 RF(i \rightarrow j) &\cong (ADR(i) \& R_{STS}(i)) \rightarrow STS(i)(t+1); \\
 RF(i \rightarrow \alpha) &\cong (ADR(i) \& \overline{R_{STS}(i)}) \mapsto ADR(j) \& \overline{R_{STS}(j)} \mapsto \dots \\
 &\dots \mapsto ADR(\alpha) \& R_{STS}(\alpha) \rightarrow STS\alpha(t+1); \\
 U_{STS}(i \rightarrow \alpha) &\cong ADR(i) \& \overline{R_{STS}(i)} \mapsto ADR(j) \& \overline{R_{STS}(j)} \mapsto \dots \quad (2.15) \\
 &\mapsto ADR(\alpha) \& \overline{R_{STS}(\alpha)} \dots \mapsto ADR(\beta) \& \overline{R_{STS}(\beta)} \mapsto \\
 &\mapsto ADR(CS) \& R_{STS}(\gamma) \rightarrow STS \gamma(t+1); \\
 U_{STS}(i \rightarrow DOP) &\cong ADR(CS) \& \bigwedge_{i=0}^k \overline{R_{STS}(i)} \rightarrow DOP,
 \end{aligned}$$

де знак $\mapsto$ задає послідовність аналізу.

У якості інструмента для роботи з алгоритмами зручно користуватися семантикою Дейкстри [241]. Розбираючи наведені їм приклади побудови алгоритмів, приходимо до важливого висновку, що доказ правильності алгоритму (програми) у Дейкстри будується одночасно з алгоритмом, або навіть трохи раніше. Вибір "форми доказу" – це розв'язання сполученого у безлічі предикатів завдання, а написання алгоритму (програми) проводиться так, щоб програма задовольняла "вимогам доказу". При цьому залучаються й інтуїтивні операційні міркування щодо того, як виконуються ті або інші інструкції й найслабкі передумови. Згідно Дейкстри, найслабкі передумови – предикат $WP(PR, \psi)$, де ψ – постумова, що є предикатом на безлічі станів V .

Причому алгоритм PR є перетворенням безлічі V у себе, тобто $V \xrightarrow{PR} V$. Тоді для будь-якого $v \in V$ справедливо, що $WP(PR, \psi) = \psi(PR(v))$, тобто предикату $WP(PR, \psi)$, що описує саму слабку умову, необхідно підкорити початковий стан V для того, щоб виконання програми $PR(V)$ завершилося й визначився заключний стан ψ .

На зміст і способи формалізації алгоритмічного забезпечення істотний вплив виявляє структура АСУ, що визначає взаємозв'язок безлічі керуючих об'єктів і об'єктів управління. Одне з призначень АСУ є виконання функцій регулювання, контролю, захисту й управління устаткуванням. Кількість цих функцій на кожній технологічній ділянці безупинно росте в міру розширення обсягу автоматизації. Тому першорядну важливість здобуває завдання децентралізації обчислювальних засобів нижнього ієрархічного рівня, яка може бути вирішена шляхом використання порівняно дешевих і компактних контролерів. Дослідження дозволили встановити, що для САЕЕС перспективних для будівлі суден, найбільш повно сформульованим принципам і критеріям відповідає багатомашинна МП-система з розподіленою структурою (рис. 2.2 та рис. 2.3). Якщо при декомпозиції даної системи не накладати обмеження на можливі зв'язки між підсистемами, то розглянуту ієрархічну структуру можна представити повним графом $GR(T, R)$, де T – безліч вершин (підсистем), рис. 2.4, а. Вершини нульового рівня відповідають місцям установки первинних датчиків і виконавчих механізмів (устаткування), безпосередньо пов'язаних із процесом, вершини першого рівня – локальним підсистемам, 2-го рівня – координаторові.

Наявність горизонтальних зв'язків говорить про недостатню централізацію рішення завдань управління у виділених центрах першого рівня, про взаємозалежність цих центрів. Тому, для спрощення структури графа шляхом виконання горизонтальної декомпозиції, структуру графа GR можна покрити деревом $TR(T, R')$, рис. 2.4, б, з тією ж кількістю вершин, але із суттєво меншим числом ребер.

При такому підході кожна локальна підсистема, незалежно від інших ЛП першого рівня, управляє своїм об'єктом, здійснюючи збір, обробку і аналіз даних з метою визначення станів агрегату, обміну даними з координатором, керування процесами пуску, зупинки, синхронізації і т.д.

При описі структур системи, можна використовувати оцінки, засновані на обміні інформацією, що використовується на різних рівнях управління. Загальний обсяг інформації, що надходить від СЕЕС безпосередньо до підсистем першого рівня визначається безліччю сигналів $X = \bigcup_{i \in N_m}^m X(i)$,

$|N_m| = m$ і рівний $I_X = \sum_{i=1}^m I_X(i)$, у той час як обсяг, переданий з першого рівня на другий, визначається безліччю $Z = \bigcup_{i=1}^m Z(i)$ і рівний $I_Z = \sum_{i=1}^m I_Z(i)$.

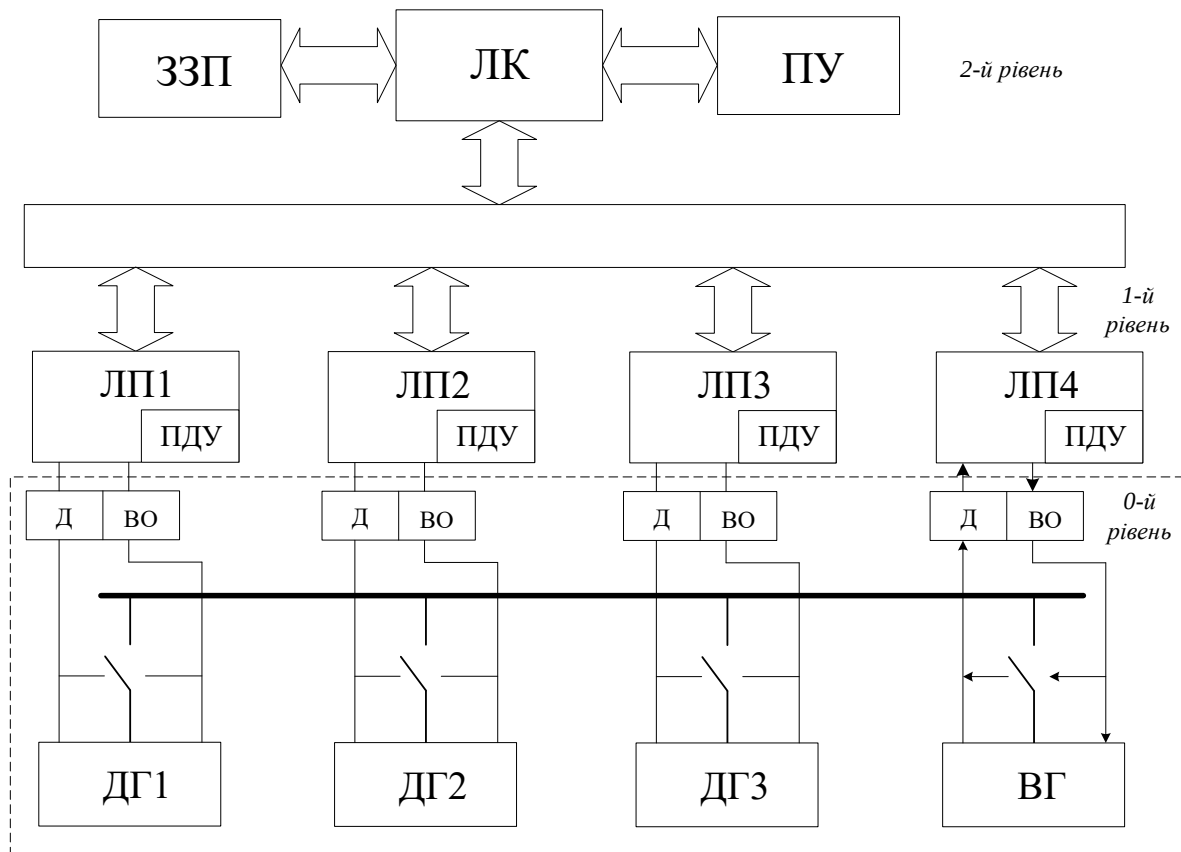


Рис. 2.3. Дворівнева МП-система управління СЕЕС

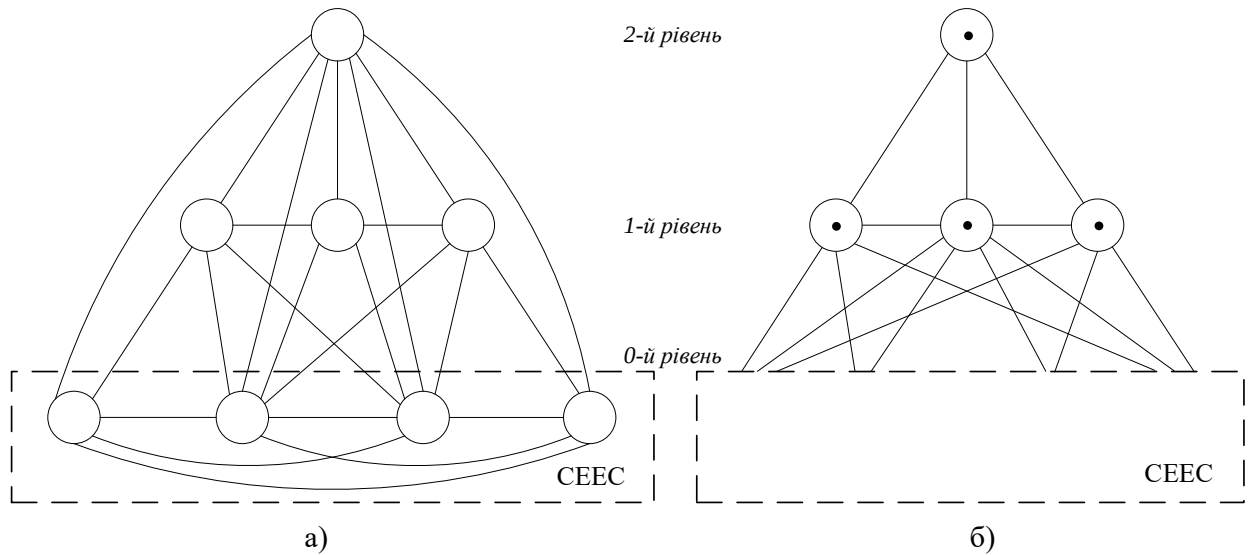


Рис. 2.4. Структура СЕЕС у вигляді повного графу (а) і покриваючого його дерева (б)

Оцінимо стиск інформації C_I у такий спосіб:

$$C_I = (I_X - I_Z) / I_X.$$

Таке приймання для ієрархічних систем однозначно характеризує активність рівнів. Очевидно, що умови існування дворівневої системи можна сформулювати у вигляді виразу

$$\sum_{i=1}^m C_I(i) < 1, C_I(i) = (I_X(i) - I_Z(i)) / I_X.$$

Опишемо основні правила функціонування системи, використовуючи умовні позначення:

а) $S = \bigcup_{i=1}^m LS(i) \cup LC$, $i \in N_m$ – система, як об'єднання локальних підсистем $LS(i)$ і координатора LC ;

б) $LS(i): X(i) \times C(i) \rightarrow Y(i)$ – відображення, що визначає вироблення керуючих впливів $Y(i)$ на i -й ГА шляхом обробки безлічі вхідних сигналів $X(i)$, що надходять у локальну підсистему (ЛП) у процесі виконання програм, а також координаційних команд $C(i)$, що надходять у ЛП від локального координатора (ЛК);

в) $LS(i): X(i) \times C(i) \times Y(i) \rightarrow Z(i)$ – відображення, що характеризує підготовку у ЛП інформації $Z(i)$ для передачі її у ЛК;

з) $X(LC) = Z_1 \times \dots \times Z_i \times \dots \times Z_m$; $Y(LC) = C_1 \times \dots \times C_i \times \dots \times C_m$ – декартові добутки безлічі входів $X(LC)$ і керуючих сигналів $Y(LC)$ від LC відповідно;

$PS = \bigcup_{i=1}^m PS(i)$, $i \in N_m$ – об'єднання підпроцесів ЛП;

д) $PS(i): Y(i) \times E(i) \rightarrow X(i)$ – відображення підпроцесу, як перетворювача керуючих впливів $Y(i)$ і зовнішніх збурювань $E(i)$ у поточному $t+1$ такті технологічного циклу у сигнали $X(i)$;

е) $\exists C \exists Y (PS(Y(LS)), D(LS)) \& PS(Y(LC)), D(LC))$ – висловлення, записане з умов принципу сумісності завдань $D(LS)$ локальних підсистем із глобальними завданнями $D(LC)$ локального координатора, тобто висловлення дійсне, якщо має розв'язання завдання вищого рівня й при цьому мають розв'язання завдання всіх нижчих підсистем.

У свою чергу, результат розв'язання $D(LS)$ повинен зробити на рівень LC для контролю виконання й використовуватися при розв'язанні завдання $D(LC)$, щоб знайти координуючий вплив $Y(LC) = C$, при якому ЛП виробляють управління $Y(LS) = Y(1) \times \dots \times Y(m)$, таке, що досягається поставлена мета координації, тобто задовольняється умова, виражена предикатами $PS(C, D(LC)) \Leftrightarrow \exists Y(LS) (\Pi(C, Y(LS)))$.

Основна причина виникнення конфлікту у дворівневій системі пов'язана з тим, що кожна ЛП не має інформації про рішення, прийняті іншими ЛП. Завдання координатора полягає у тому, щоб виявляти на ЛП такий вплив, який привів би до бажаних результуючих взаємодій. Раніше нами сформульований ряд принципів організації (зосередження функцій, ергатичності, функціонально-структурної ієрархії та ін.), які визначають для координатора різні стратегії. Крім того уведемо додаткові принципи.

Принцип 1. Прогнозування взаємодій. Координуючі сигнали містять у собі інформацію про передбачувані взаємодії підсистем, що спільно беруть участь у розв'язанні завдань управління (наприклад, у вигляді оцінки взаємодій $m \in M$). У цьому випадку ціль координації, що виражена предикатом $\Pi(C, Y(LS))$, може бути конкретизована у вигляді:

$$\Pi(C, Y(LS)) \Leftrightarrow (K(Y(LS)) = \hat{m}(C)).$$

Координатор при оцінці взаємодій не повідомляє "точкових" оцінок m , а лише вказує можливі області їх зміни $M(C) \in M$. Тому ціль координації:

$$\Pi(C, Y(LS)) \Leftrightarrow (K(Y(LS)) \in M(C)).$$

Принцип 2. Узгодження взаємодій. Кожний стоячий нижче активний елемент одержує право при розв'язанні власного завдання розглядати зв'язані входи як додаткові вільні змінні, вибираючи їх за своїм розсудом. Завдання стоячого нижче рівня визначаються як повністю "розв'язані", тобто автономні, а ціль координації полягає у зменшенні розбіжностей між фактичними взаємодіями $m \in M$ і тими значеннями $m(Y(LS))$, які обрані стоячими нижче активними елементами при розв'язанні ними власних завдань:

$$\Pi(C, Y(LS)) \Leftrightarrow (K(Y(LS)) = m(Y(LS))).$$

Реалізація сформульованих принципів вимагає проведення декомпозиції функціональних завдань у рамках аналізу функціональної структури. Використаємо метод контурної декомпозиції, у основі якого покладено спосіб виділення контурів прийняття рішень для кожного завдання управління.

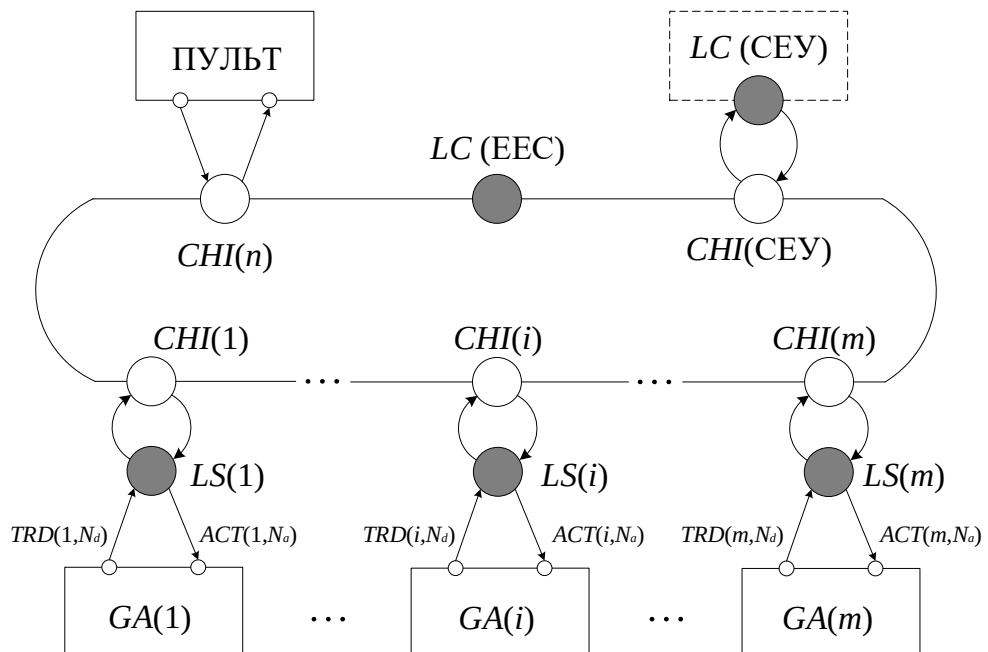


Рис. 2.5. Узагальнена схема контурної декомпозиції МП-системи управління СЕЕС

Розглянемо його стосовно до структури САЕЕС.

Процеси ухвалення рішення становлять основу всякого управління, їх характерною рисою є замкнутість, як це показано на рис. 2.5. Процеси проходять у замкнених контурах, що містять:

$$GA(N_m) = \bigcup_{i \in N_m}^m GA(i), \quad |N_m| = m \text{ — об'єкти управління;}$$

$$TRD(N_m, N_d) = \bigcup_{i,j}^{m,d} TRD(i, j), \quad i \in N_m, \quad j \in N_d \text{ — датчики з нумерацією}$$

$N_d = \overline{1, d}$ датчиків для кожного $GA(i)$;

$$ACT(N_m, N_a) = \bigcup_{i,j}^{m,a} ACT(i, j), \quad j \in N_a, \quad |N_a| = a \text{ — виконавчі органи з нуме-}$$

рацією $N_a = \overline{1, a}$ для кожного $GA(i)$;

$$CHI(N_m) = \bigcup_{i \in N_m}^m CHI(i), \quad i \in N_m \text{ — елементи обміну інформацією.}$$

Таким чином, для кожного завдання управління ($D(j) \in D(N_D)$), (N_D — нумерація завдань), можна виділити деяку кількість ε контурів $CNT(N_\varepsilon)$, зв'язаних об'єднанням ($\varepsilon \in |N_\varepsilon|$, $N_\varepsilon \in N_{CNT}$ — нумерація контурів):

$$CNT(N_\varepsilon) \subseteq (GA(N_{GA}(j) \in N_m) \cup TRD(N_{TR}(j) \in N_d) \cup ACT(N_{AC}(j) \in N_a) \cup CHI(N_{CH}(j) \in N_m)),$$

де $N_{GA}(j)$, $N_{TR}(j)$, $N_{AC}(j)$, $N_{CH}(j)$ — сукупності номерів ГА, датчиків, виконавчих органів, елементів обміну інформацією відповідно, що брали участь у розв'язанні $D(j)$ завдання управління.

Для розглянутої структури САЕЕС можливі два варіанти контурів:

а) контур замикається у одному ешелоні, тобто прийняття рішення виконується у межах одного організаційного рівня;

б) контур пронизує обидва рівні, тобто прийняття рішення вимагає координації з боку вищого рівня.

До першого варіанту будемо відносити також контури рішень, що виконуються за командами одного рівня, що й передають інформацію про намічені дії вищому рівню (який не може скасувати рішення нижнього контуру), але на підставі отриманої інформації виробляє глобальне рішення.

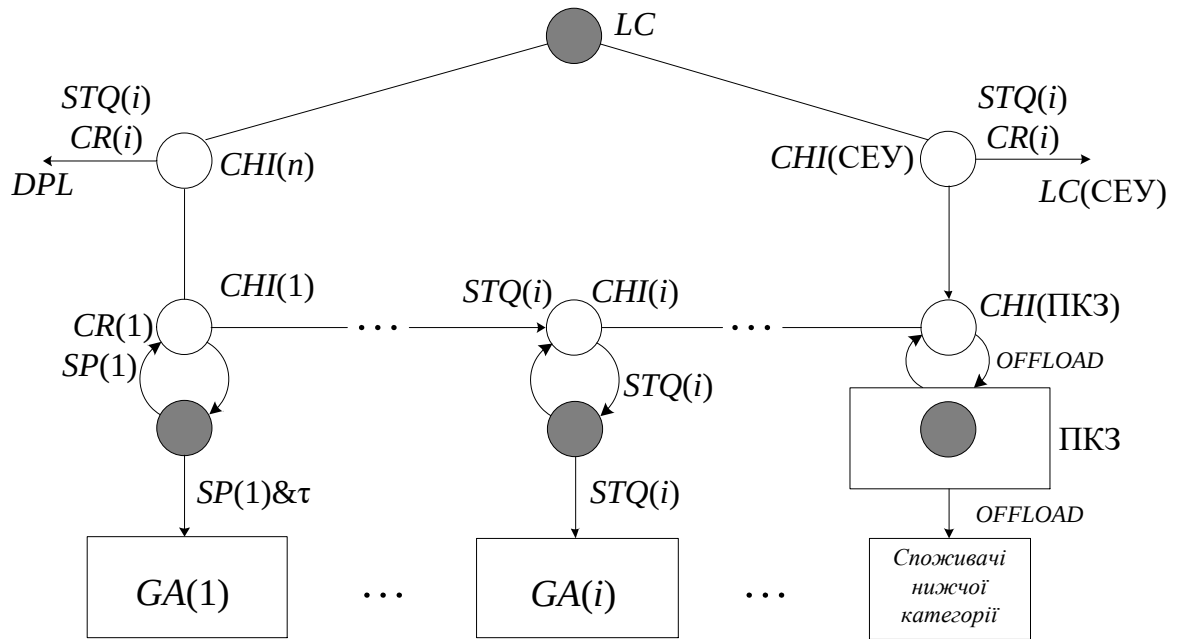


Рис. 2.6. Деталізований фрагмент узагальненої схеми контурної декомпозиції МП-системи управління СЕЕС

Наприклад (див. рис. 2.6), якщо у працюючого $GA(1)$ виникла критична аварія, то $LS(1)$ формує сигнал $SP(1)$ на відключення $GA(1)$ з максимально припустимою за умовами технічної експлуатації затримкою τ й одночасно передає інформацію у LC , який пустить у хід ряд паралельних програм, спрямованих на "порятунок" системи електропостачання шляхом екстреного запуску $STQ(i)$ i -го ГА, розвантаження СЕЕС відключенням частини споживачів через пристрій контролю й захисту (ПКЗ) і повідомленням оператору $CR(1)$ – "Критична аварія ДГ № 1". Крім того, відомості про отриману інформацію будуть передані на вищий рівень $CHI(CEY)$ – у систему управління енергетичною установкою судна.

Контурна декомпозиція сприяє не тільки наочному і компактному викладенню процесів переробки інформації у ланках системи, але й уточненню й остаточному вибору елементів зв'язку. Наведені положення дозволяють розробити вихідний елемент – ядро інформаційного забезпечення, провести кількісну оцінку інформаційних потоків, тобто встановити місця, види, періодичність, частоту виникнення, взаємозв'язок джерел і видів інформації, часові й кількісні характеристики.

При розробці інформаційного забезпечення МП СУ СЕЕС ми будемо розглядати його на трьох рівнях структур даних – фізичному, логічному й змістовному. Причому під терміном "дані" будемо мати на увазі відомості, одержувані у результаті прямого спостереження за контрольованим об'єктом і виражені у вигляді чисел, слів або спеціальних позначень. До даних ставляться контрольовані параметри ГА, як аналогові (струми, напруга), так і дискретні (стан комутаційної апаратури всіх видів, команди, що подаються оператором). Первинна обробка даних може здійснюватися периферійним устаткуванням (апаратний спосіб), або самим МП-комплексом (програмний спосіб). Результатом обробки є логічний і змістовний рівень структури даних, де важливі не тільки значення, але й зміст даних. Крім того, інформаційні дані будемо класифікувати за трьома ознаками: періодичність у масштабі часу $T_{\text{тц}}$ (технологічного циклу), часовому характеру (аналогова, дискретна) і принципу фіксації (опитувана й реєстрована).

По першій ознаці розділимо всю інформацію на постійно опитувану (періодичність опитування датчиків не більш $T_{\text{тц}}$), на періодичну, якщо періодичність опитування $nT_{\text{тц}}$, $2 \leq n < 8$, і епізодичну, якщо $n > 8$. Для визначення значення $T_{\text{тц}}$, можна використовувати вираження $T_{\text{тц}} = \tau_{\text{фз}} + \tau_{\text{вв}} + \tau_{\text{дв}}$, де $\tau_{\text{фз}}$ – час виконання програм функціональних завдань; $\tau_{\text{вв}}$ – час уведення й виводу інформації; $\tau_{\text{дв}}$ – час необхідний на розв'язання діагностичних завдань і виконання різних допоміжних функцій.

Аналіз публікацій, а також дослідження МП-систем управління САЕ-ЕС морських суден різного типу діючого флоту показує, що значення $T_{\text{тц}}$, вибирається залежно від швидкості протікання процесу (близько 0,5 с), для процесів пуску ГА, синхронізації, розподілу й скидання навантаження.

При формуванні інформаційних даних, необхідним є пошук ефективних способів оцінки миттєвих значень фізичних величин [10, 14, 243], що відображають електроенергетичні параметри (напруги, струми, потужність, напрямок потужності, частота й ін.). Це пов'язане з інтенсифікацією процесів

управління й викликає необхідність розширення фронту наукових досліджень, експериментів, пошуку способів одержання не окремих вимірів, а потоку інформації у обмежений час. Деякі з таких нових способів пропонуються у розділі 3.

Узагальнена структурно-логічна схема процесу наукового дослідження, метою якого є удосконалення управління складними технічними системами і комплексами при експлуатації суден у різних експлуатаційних умовах, наведена на рис. 2.7, а особливості синтезу АСУ складних СТС і К різного призначення показані на рис. 2.8 [77, 78].

Технологічна карта-схема дослідження, з урахуванням визначених завдань і наукових результатів, що виносяться на захист, наведена на рис. 2.9.

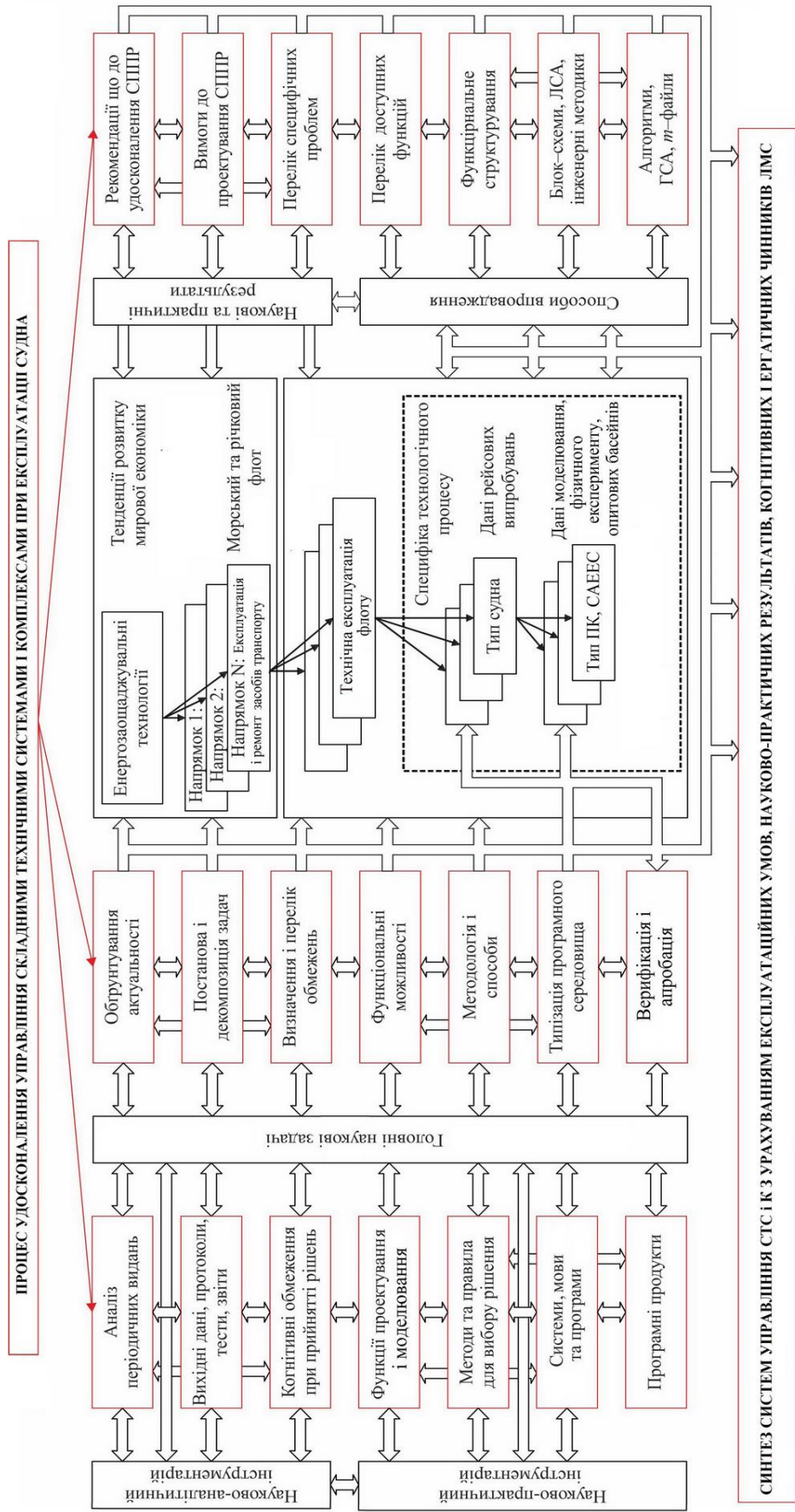


Рис. 2.7. Узагальнена структурно-логічна схема процесу наукового дослідження

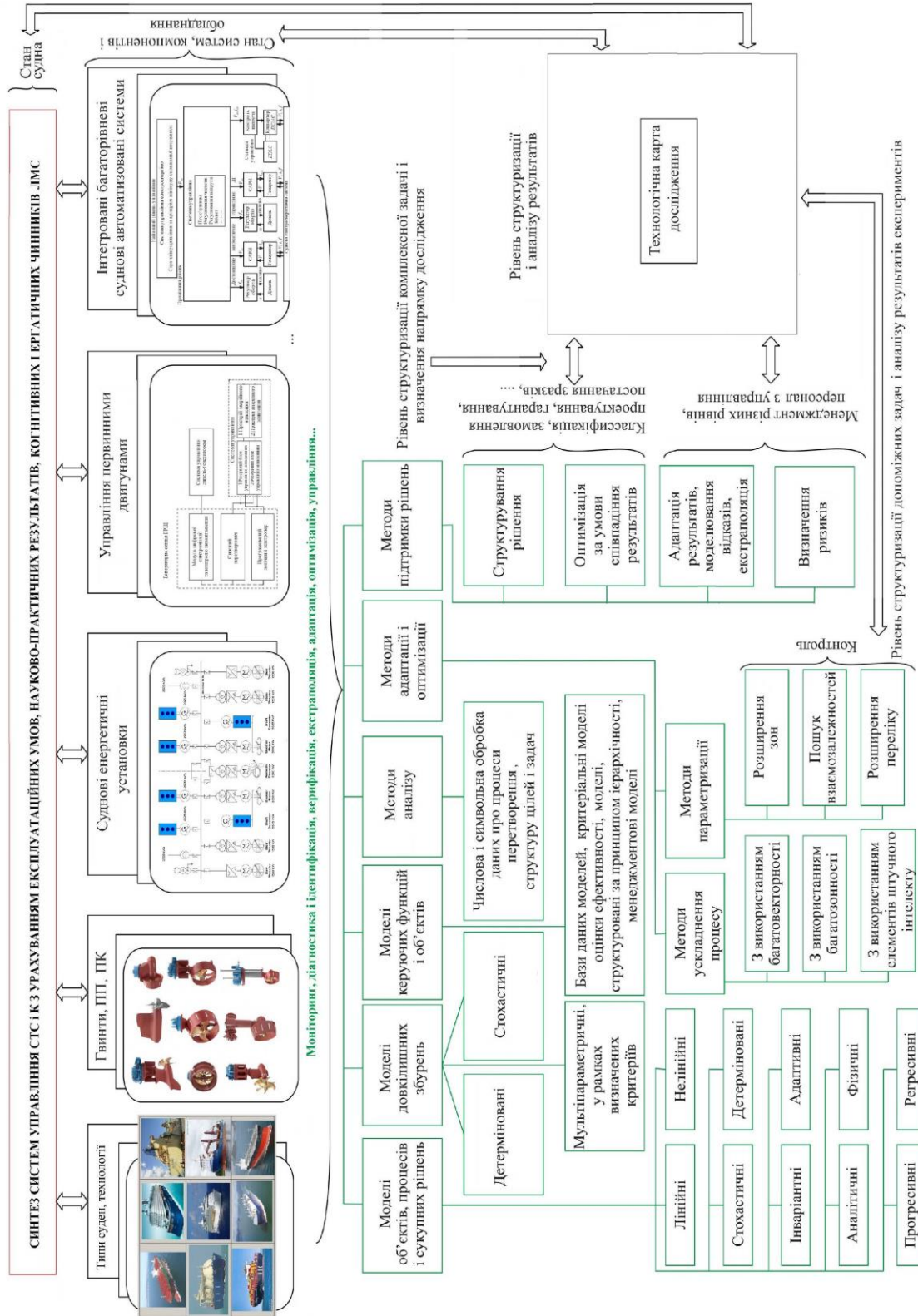


Рис. 2.8. Особливості синтезу АСУ складних СТС і К різного призначення

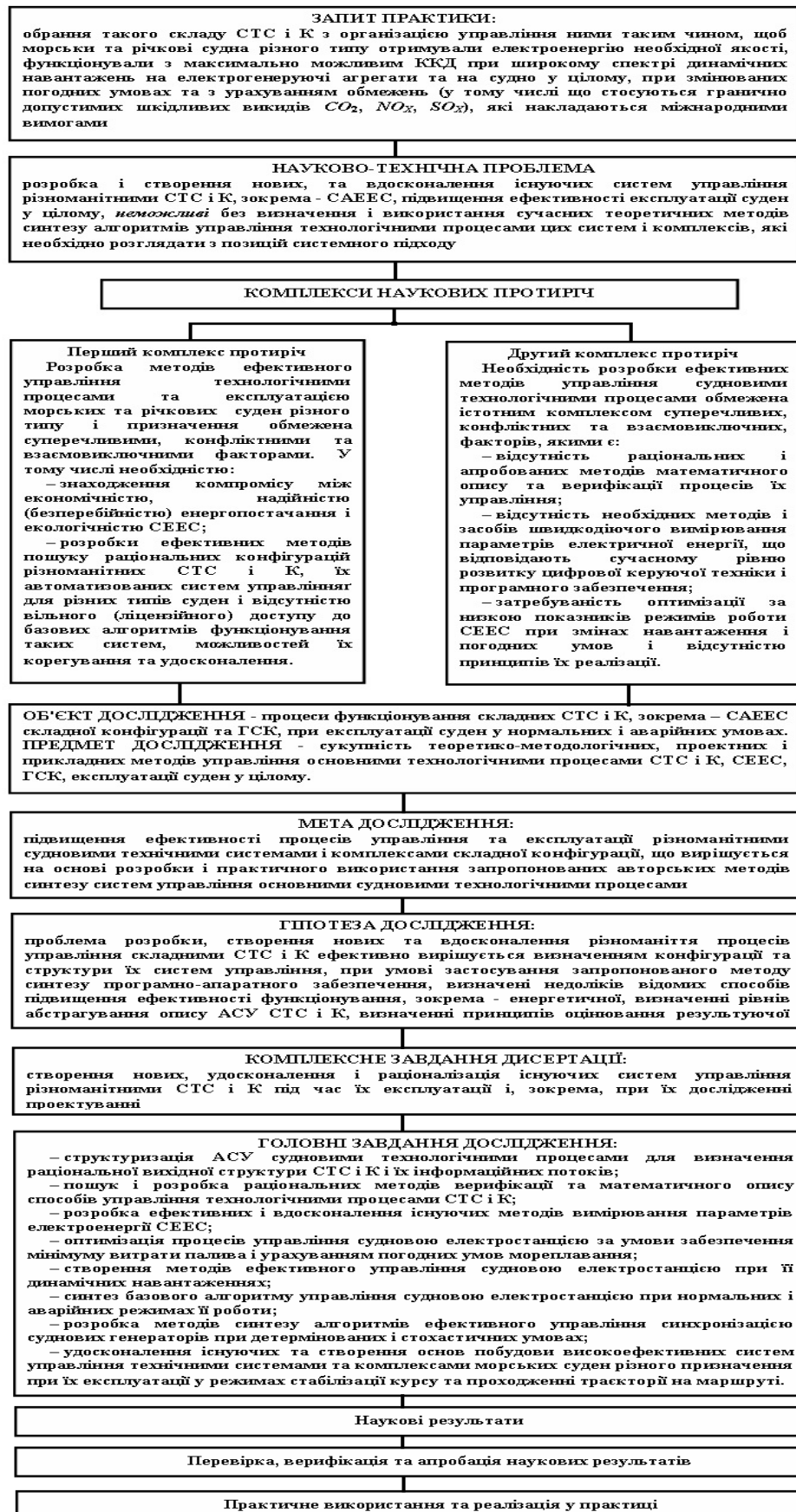


Рис. 2.9. Узагальнена технологічна карта-схема дисертації

Висновки до розділу 2

У розділі визначені основні, використані у ході дослідження, методологічні основи і принципи аналізу та синтезу процесів управління складними СТС і К (теоретичні засади, головні методи, концептуальні підходи).

1. Визначені методологія і принципи побудови алгоритмів управління, ергатичного аналізу та оцінювання ефективності процесів експлуатації складних СТС і К, принципи побудови розподілених ієрархічних АСУ СТС і К складної конфігурації, визначена "технологія" наукового дослідження.

2. На прикладі функціонування автоматизованої СЕЕС розглянуто особливості виділених системних стадій побудови АСУ, визначені принципи апаратурно-програмної надмірності, принципи ергатичності і ергономічності, функціонально-структурної ієрархії і системного аналізу. Запропоновані структури нерезервованих розподілених і дворівневих МП-систем управління СЕЕС, представлено структури СЕЕС у вигляді повних графів і покриваючого їх древа, наведена узагальнена схема контурної декомпозиції МП-системи управління СЕЕС.

3. Запропоновано алгоритм синтезу систем управління складними СТС і К, який містить етап розв'язання завдань, пов'язаних з визначенням архітектури АСУ ТС і К з встановленням основних принципів взаємодії та визначенням особливостей обміну інформацією між частинами системи (підсистемами, апаратурою тощо). Функціонування кожної підсистеми і пристрою пропонується описувати у знаковій системі, а зв'язок між елементами здійснювати за допомогою загальних змінних, що зіставляються з наборами сигналів на вхідних і вихідних каналах окремих пристроїв (блоків). Встановлено, що формування отриманої сукупності описів пристроїв формальною мовою знакових систем і описів зв'язків між ними, дозволяє визначити алгоритмічну структуру СТС і К, наприклад, для АСУ СЕЕС, яка є вихідним об'єктом для досліджень і є основою для подальшої оптимізації.

4. Визначено, що для досягнення одержання максимально можливої повноти інформації і повного розуміння розв'язуваної проблеми управління СТС і К, опис функцій управління необхідно проводити на різних рівнях абстракції. Запропоновано ідею абстрагування опису, яка полягає у тому, щоб розглядати систему понять предметної області і відповідність між нею і системою понять формальної моделі, як вихідну інформацію для розв'язання прикладних завдань управління СТС і К. Саме це забезпечує можливість зміни системи понять предметної області і визначення нових понять через відомі системи.

5. З метою синтезу об'єктно-орієнтованого програмного продукту, вбудованого у СТС і К, розглянута інтеграція трьох способів його опису: орієнтованих графів, булевих і результатних функцій. Такий підхід дозволив реалізувати процедурні і логічні методи викладення знань, що засновані на семантичних мережах (орієнтованих графах). Встановлено, що розглянувши логічні твердження як об'єкти, з'являється можливість класифікації й структурування наборів формул, що частково компенсує недоліки логічних методів викладення знань і дозволяє побудову ефективних САУ СТС і К.

РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ПІДТРИМКА СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ СТС І К

3.1. Принцип автоматизованого виміру і контролю навантаження САЕЕС із використанням імовірнісного підходу

Для одержання поточної інформації про стан об'єкта управління СТС, інформаційно-вимірювальна система (ІВС) повинна виконувати наступні основні функції: сприйняття вимірюваних вхідних величин і перетворення їх у сигнали, необхідні для наступних операцій; формування й реалізація норм у аналоговому й цифровому видах; порівняння величин вхідних сигналів або функцій від них з нормами (уставками); формування кількісного судження й видача його у інформаційну модель або/та у контур АСУ [1, 2, 10-17, 85-88].

Наявність погрешностей пристроїв виміру й контролю приводить до специфічних помилок, які слід урахувати при оцінці якості контролю й розв'язанні завдань управління. Будемо розрізняти помилки першого роду, що визначають імовірність неправдивого показання (спрацьовування "аларма") і помилки другого роду, що визначають імовірність пропуску реєстрації переходу параметром x граничного значення [10-14, 243, 245, 246].

Зв'яжемо параметр x з генерованою потужністю у ходовому режимі l -паралельно працюючими ГА, зміна якої повинна контролюватися між верхніми x_{PH} і нижніми x_{PD} порогоми завантаження.

Якщо не враховувати рідкі піки навантаження, що викликані включенням потужних, епізодично працюючих споживачів (пожежний насос, компресор пускового повітря і т. ін.), то, процес навантаження СЕЕС у режимах ходу й стоянки судна без вантажних операцій можна віднести до стандартного, ергодичного процесу з нормальною щільністю розподілу ймовірностей значення потужності $F(x)$. Припустивши, що вимірюване навантаження x і похибка виміру у імовірнісному змісті незалежні, то результат управління можна одержати, оперуючи з композицією щільності розподілу $F(x)$ і $\theta(\varepsilon)$, рис. 3.1, а, б.

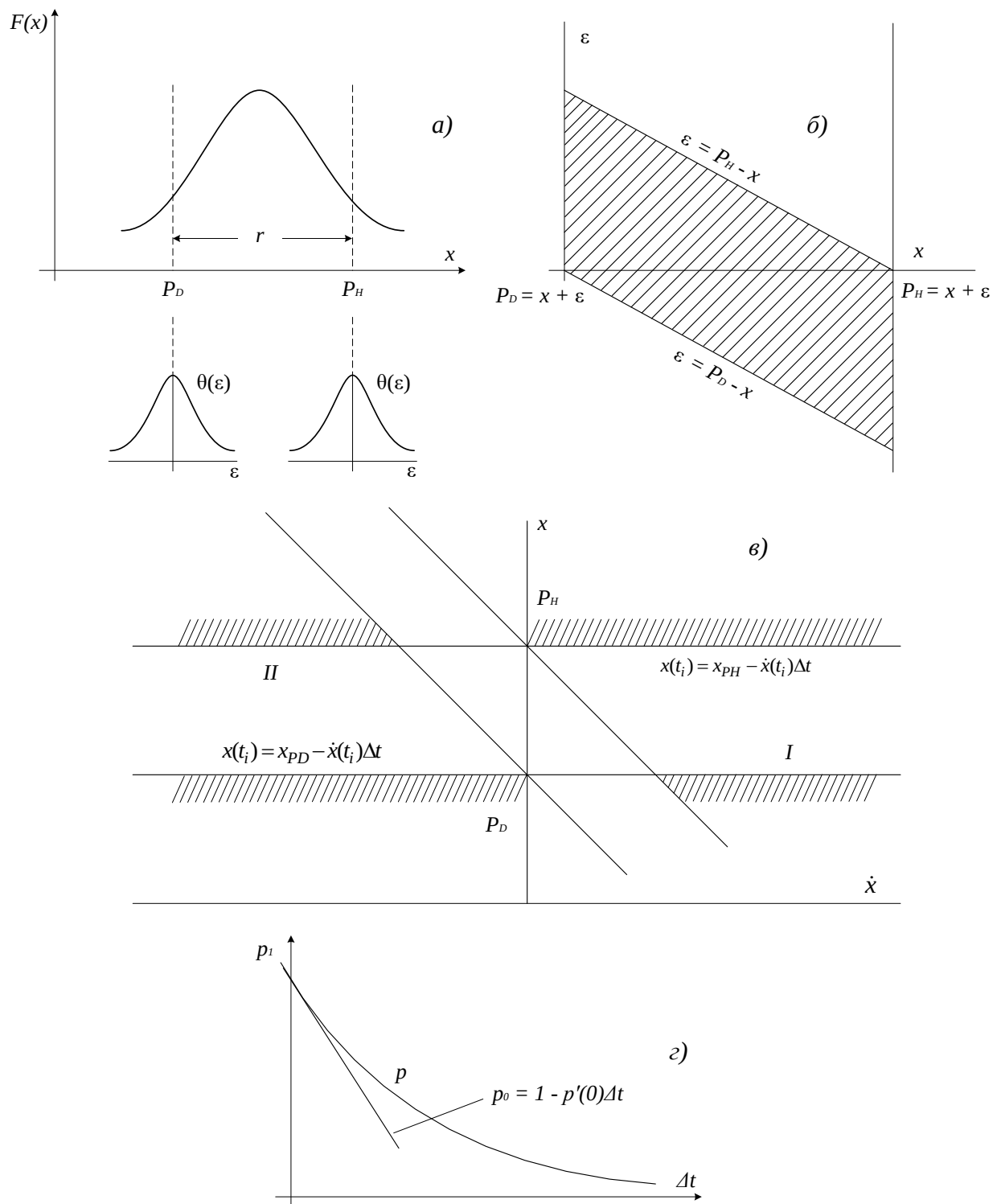


Рис. 3.1. Щільності розподілу:

- а) щільність розподілу імовірності контрольованої змінної $F(x)$;
- б) щільність розподілу імовірності похибки $\theta(\epsilon)$;
- в) композиція $F(x)$ і $\theta(\epsilon)$;
- г) композиція $f_1(x)$ і $f_2(x)$;
- д) графік, що пояснює процес визначення імовірностей $p_0(\delta)$

Як відомо, якщо щільності розподілу $F(x)$ і $\theta(\varepsilon)$ нормальні, то щільність розподілу суми незалежних випадкових величин буде також нормальною, а математичні очікування і дисперсії випадкових величин x і ε підсумовуються.

Якщо на похибку виміру накласти обмеження $x_{PH} - x_{PD} > \varepsilon_{\max}$ і скористатися висновками [10, 14, 85, 87, 88, 243, 246], то можна знайти ймовірність похибки першого MIS(1) і другого MIS(2) роду:

$$\begin{aligned} \text{MIS}(1) &= \int_{PD(l)}^{PH(l)} F(x) \left(\int_{-\infty}^{x_{PD}-x} \theta(\varepsilon) d\varepsilon + \int_{x_{PH}-x}^{\infty} \theta(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx; \\ \text{MIS}(2) &= \int_{-\infty}^{PD} F(x) \left(\int_{x_{PD}-x}^{x_{PH}-x} \theta(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx + \int_{PH}^{\infty} f(x) \left(\int_{x_{PD}-x}^{x_{PH}-x} \theta(\varepsilon) d\varepsilon \right) dx; \end{aligned}$$

Для практичних цілей становить інтерес використання наближених оцінок цих імовірностей, наприклад, з використанням номограм, що зв'язують середньо-квадратичне відхилення похибки пристроїв виміру σ_ε і контрольованої величини σ_x , а також зону допуску r . При заданих значеннях r/σ_x з номограми можна знайти або $3\sigma_\varepsilon/r$ або $3\sigma_\varepsilon/\sigma_x$. Зменшення помилок може бути досягнуто багаторазовим повторенням операцій контролю або шляхом дворазового контролю, використовуючи, з урахуванням необхідної точності, різні системи контролю [1, 10, 14-16, 33, 243].

У процесі виміру й контролю виникає завдання дискретизації тієї або іншої контрольованої величини, тобто завдання визначення припустимого значення інтервалу контролю. Зв'язане це з тим, що вірогідність контролю у міру збільшення інтервалів знижується. Допустимо, що у момент t_i виконана операція контролю навантаження СЕЕС й встановлено, що вона перебуває у зоні $\{PH, PD\}$ рис. 3.1. У цьому випадку оцінкою результату контролю може служити ймовірність p ($x \in r$) того, що при $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ навантаження не вийде за межі $\{PH, PD\}$, тобто будуть виконані умови:

$$x_{PD} \leq x(t_i + \Delta t) \leq x_{PH} \quad (3.1)$$

де $x(t_i + \Delta t) = \dot{x}(t_i)\Delta t$, а $\dot{x}(t_i)$ – похідна.

Імовірність $p(x(t_i + \Delta t))$ залежить від ширини інтервалу r , динамічних властивостей навантаження й значення $x(t_i)$. Вона може бути знайдена інтегруванням умовної щільності $f(x, \dot{x}/x_{PD}) < x < x_{PH}$ у областях I і II (рис. 3.1, в).

Якщо припустити, що розподіл $\dot{x}$ також нормальний [245, 246], то

$$f(x, \dot{x}) = f_1(x)f_2(\dot{x}) \quad (3.2)$$

$$\text{де } f_1(x) = \frac{1}{p\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x - M_x^2)^2}{2\sigma_x^2}\right); f_2(\dot{x}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\dot{x}}} \exp\left(-\frac{\dot{x}^2}{2\sigma_{\dot{x}}^2}\right).$$

Імовірність $(1 - p)$ може бути знайдена як

$$\begin{aligned} 1 - p = & \int_{x_{PH} - \dot{x}\Delta t}^{(x_{PH} - x_{PD})/\Delta t} f_2(\dot{x})d\dot{x} \int_{x_{PD}}^{x_{PH}} f_1(x/x_{PD}, x_{PH})dx + \int_{(x_{PH} - x_{PD})/\Delta t}^{\infty} f_2(\dot{x})d\dot{x} \int_{x_{PD}}^{x_{PH}} f_1(x/x_{PH}, x_{PD})dx + \\ & + \int_{x_{PD}}^{(x_{PD} - x_{PH})\Delta t} f_2(\dot{x})d\dot{x} \int_{x_{PD}}^{x_{PH}} f_1(x/x_{PD}, x_{PH})dx. \end{aligned}$$

При малих Δt (див. рис. 3.1, з), імовірність p буде рівна:

$$p_0 = 1 - \Delta t(dp/d(\Delta t))\Delta t = 0.$$

Звідси $\Delta t = \frac{t - p_0}{(dp/d(\Delta t))\Delta t}$. Диференціюючи вираження $(1 - p)$ за Δt і

підставляючи його у вираження для Δt , можна одержати припустиме значення інтервалу контролю:

$$\Delta t_{\text{доп}} = \frac{p(1 - p_0^*)}{\frac{\sigma_{\dot{x}}}{2\pi\sigma_x} \left(\exp\left(-(x_{PH} - M_x)^2 / 2\sigma_x^2\right) + \exp\left(-(x_{PD} - M_x)^2 / 2\sigma_x^2\right) \right)},$$

де p і p_0^* – апіорна й задана ймовірності знаходження контрольованої величини навантаження.

Для спрощеного визначення інтервалу контролю при відомій максимальній погрішності $\varepsilon_{\max}$ і максимумі модулю першої похідної контрольованого навантаження можна скористатися виразом:

$$\Delta t = \varepsilon_{\max} / (dx(t)/dt)_{\max},$$

і при цьому прийняти $\varepsilon_{\max} = 3\sigma_{\varepsilon}$, а $(dx(t)/dt)_{\max}$ визначити, провівши відповідний аналіз функції $f(\dot{x})$.

Цей підхід застосуємо, також, до дослідження режимів навантаження СЕЕС у частині аналізу викидів випадкового процесу [14, 246]. Основними характеристиками викидів навантаження за верхній і нижній пороги можуть бути $T_{\Sigma PH} = \sum_i P_i t_i = E_{PH} T$; $T_{\Sigma PD} = \sum_i P_i t_i = E_{PD} T$ – сумарні тривалості всіх викидів за рівні PH і PD протягом заданого відрізка часу T , пов'язаного із цілком певним режимом роботи судна (хід, стоянка і т. ін.); E_{PH} , E_{PD} – імовірність викиду за час T ; $\bar{v}_{PH,PD} = N_{PH,PD} / T_{PH,PD}$ – середня частота викидів; $\tau_{PH,PD} = 1 / \bar{v}_{PH,PD}$ – середня тривалість викиду; $(x_{\max}(\tau_{PH}) - x_{PH})$ або $(x_{PD} - x_{\min}(\tau_{PD}))$ – величина викиду.

Подальший розгляд будемо вести тільки щодо викидів за верхній рівень навантаження PH . Найважливішими питаннями при цьому є визначення закону розподілу часу перебування випадкової функції вище заданого рівня й закону розподілу числа викидів.

Вихід навантаження за верхню межу описується нерівністями

$$x(t) + \dot{x}(t)dt > x_{PH} \text{ або } x_{PH} - \dot{x}(t)dt < x(t) < x_{PH},$$

а ймовірність викиду E_{PH} буде визначатися вираженням:

$$E_{PH} (x_{PH} - \dot{x}(t)dt < x(t) < x_{PH}) = \int_0^{\infty} \int_{x_{PH} - \dot{x}dt}^{x_{PH}} f(x(t), \dot{x}(t)) dx d\dot{x} \quad (3.3)$$

Оскільки $\dot{x}dt \ll x_{PH}$, тобто межі інтегрування відрізняються мало, а також вважаючи, що ймовірність викиду пропорційна величині інтервалу часу, спростимо вираження (3.3) і введемо поняття часової щільності для ймовірності викиду $l_{PH}(x_{PH}/t)$:

$$l_{PH}(x_{PH}/t) = \int_0^{\infty} f(x_{PH}, \dot{x}/t) dx d\dot{x};$$

$$l_{PD}(x_{PD}/t) = \int_0^{\infty} f(x_{PD}, \dot{x}/t) dx d\dot{x}, \quad (3.4)$$

де $f(\dot{x}/t)$ – умовна щільність розподілу величини $\dot{x}$ у часі.

У такому випадку середній час перебування навантаження вище заданої межі за проміжок часу T знайдемо, як

$$T_{\Sigma PH, PD} = \int_0^T \int_{x_{PH}}^{\infty} f(x/t) dx dt, \quad (3.5)$$

а середня тривалість одного викиду (з практичної точки зору це найважливіша характеристика):

$$\bar{\tau}_{PH} = \frac{\bar{T}_{\Sigma PH}}{N_{PH}} = \frac{\int_0^T \int_{x_{PH}}^{\infty} f(x/t) dx dt}{\int_0^T \int_0^{\infty} f(x_{PH}, dx/t) dx dt}. \quad (3.6)$$

Якщо тепер припустити, що умовна щільність розподілу ординат випадкової функції $f(x/t)$ і функції $f(dx/t)$ не залежать від часу, то завдання у пошуку $\bar{\tau}_{PH}$ значно спрощується. У цьому випадку, аналогічно (3.2), закони розподілу $f(x)$ і $f(x, \dot{x})$ однозначно виражаються через математичне очікування M_x і дисперсії σ_x і $\sigma_{\dot{x}}$, оскільки математичне очікування похідної $M_{\dot{x}}$ внаслідок стаціонарності випадкового процесу дорівнює нулю.

Дисперсію $\sigma_{\dot{x}}^2$ визначимо через кореляційну функцію швидкості у нулі ($\tau = 0$): $\sigma_{\dot{x}}^2 = -\frac{d^2 K_x(r)}{d\tau^2} \Big|_{\tau=0}$. У результаті перетворень одержимо:

$$T'_{\Sigma PH} = T \int_{x_{PH}}^{\infty} f(x) dx; \quad N'_{PH} = T \int_0^{\infty} dx f(x, \dot{x}) d\dot{x}; \quad \bar{\tau}'_{PH} = \frac{\int_{x_{PH}}^{\infty} f(x) dx}{\int_0^{\infty} dx f(x, \dot{x}) d\dot{x}}; \quad (3.7)$$

$$v_{PH} = \frac{N'_{PH}}{T} = \frac{\sigma_{\dot{x}}}{2\pi\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x_{PH} - M_x)^2}{2\sigma_x^2}\right); \quad (3.8)$$

$$\tau'_{PH} = \pi \frac{\sigma_x}{\sigma_{\dot{x}}} \exp\left(-\frac{(x_{PH} - M_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \left(1 - \Phi\left(\frac{x_{PH} - M_x}{\sigma_x}\right)\right),$$

де $\Phi(z) = \Phi(M_x, \sigma_x, x_{PH})$ – функція Лапласа:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-x^2/2} dx, \quad z = \frac{x_{PH} - M_x}{\sigma_x}.$$

Слід зазначити, що, користуючись таблицями функцій $\Phi(z)$ Лапласа, наприклад [247], можна підрахувати ймовірність зворотного влучення прогнозованого навантаження $x \in N(M_x, \sigma_x)$ у інтервал x_{PH}, x_{PD} . Для цього треба

спочатку розрахувати $z_1 = \frac{x_{PD} - M_x}{\sigma_x}$ та $z_2 = \frac{x_{PH} - M_x}{\sigma_x}$, а потім, за допомогою таблиць [247] Лапласа знайти $\Phi(z_1)$ і $\Phi(z_2)$. У такому випадку ймовірність [245, 246] визначаємо як

$$p(x_{PD} < x < x_{PH}) = \Phi(z_2) - \Phi(z_1) \quad . \quad (3.9)$$

При визначенні процесів управління необхідним складом ГА з використанням накопичувачів електроенергії знадобитися прогноз значення енергії, необхідної для забезпечення викиду навантаження вище заданого рівня. Зрозуміло, що у такому випадку середня площа $\bar{S}$, обмежена реалізацією нормальної й стаціонарної випадкової функції вище заданого рівня x_{PH} за час викиду, і тому визначається за (3.10):

$$\bar{S} = \frac{\sigma_x^2 \sqrt{2\pi}}{\sigma_{\dot{x}}} + \frac{(\bar{x} - x_{PH})\sigma_x \pi}{\sigma_{\dot{x}}} \left(1 - \Phi\left(\frac{x_{PH} - \bar{x}}{\sigma_x}\right) \exp\left(-\frac{(x_{PH} - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right) \right). \quad (3.10)$$

Визначимо, також, запит оцінки глобального математичного очікування M_x навантаження на розглянутому інтервалі, що зберігається у пам'яті комп'ютера й повинне періодично корегуватися (якщо вимагають цього результати оцінки). Для цієї мети скористаємося методом Монте-Карло [248]. У такому випадку пам'ять комп'ютера повинна мати середнє з вибірки значення x навантаження за останні $N > 10$ спостережень. Уважаючи, що розподіл випадкових значень $\bar{x}$ є асимптотично нормальний й враховуючи відоме правило "трьох сігм" [244]:

$$P(|M_x - \bar{x}| < 3 \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}) \approx 2\Phi_0(3) \approx 0,997,$$

сформулюємо умови необхідності корекції глобального математичного очікування у вигляді предиката Π_{mx} :

$$\forall M_x \forall \bar{x} \forall \sigma_x \forall N \left(|M_x - \bar{x}| > 3 \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \right) \rightarrow \Pi_{MX}(M_x, \bar{x}, \sigma_x, N), \quad (3.11)$$

$$\text{де } \sigma_x \approx \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2}.$$

Для одержання достовірних імовірнісних характеристик процесу навантаження необхідно мати досить велике число її реалізацій. У такому випадку статистичні оцінки характеристик M_x і $K_x(\tau)$ отримуємо шляхом усереднювання з безлічі реалізацій у різних перетинах функції $x(t)$. Однак, їх можна одержати шляхом осереднення за часом однієї-єдиної реалізації досить великої довжини, якщо вважати процес ергодичним. Тоді статичну оцінку постійного математичного очікування [245, 246] знайдемо усереднюванням:

$$m_x^* = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt, \quad (3.12)$$

а для визначення оцінки кореляційної функції використаємо відомі формули:

$$K_x^*(t) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} (x(t) - m^*(x))(x(t + \tau) - m_x^*) dx; \quad (3.13)$$

$$K_x^*(t) = \frac{1}{m - n - 1} \sum_{i=1}^{m-n} (x(t_i) - \bar{x})(x(t_i + \tau) - \bar{x}),$$

де m – кількість інтервалів квантування на всьому інтервалі T , а n – кількість інтервалів квантування на інтервалі τ .

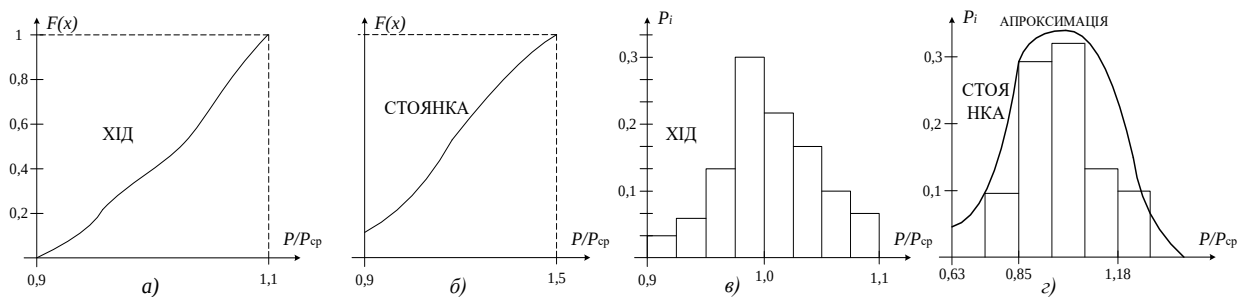


Рис. 3.2. Інтегральний закон розподілу навантаження (а, б), гістограми навантаження (в) і апроксимація нормальним розподілом (г)

Підкреслимо, що ці формули справедливі у припущенні ергодичності процесу, про який можна судити за поведінкою його кореляційної функції. Так, якщо $K_x(\tau)$ сходиться до нуля на кінцевому інтервалі τ , то цей факт служить достатньою умовою ергодичності самого процесу $x(t)$ (див. рис. 3.3, б), бо $|K_x(\tau)| \leq 0,05$. На рисунках 3.3, 3.4 і 3.5 наведені результати статистичної

обробки проведених експериментальних досліджень ходового режиму і режиму стоянки СЕЕС для різного типу суден.

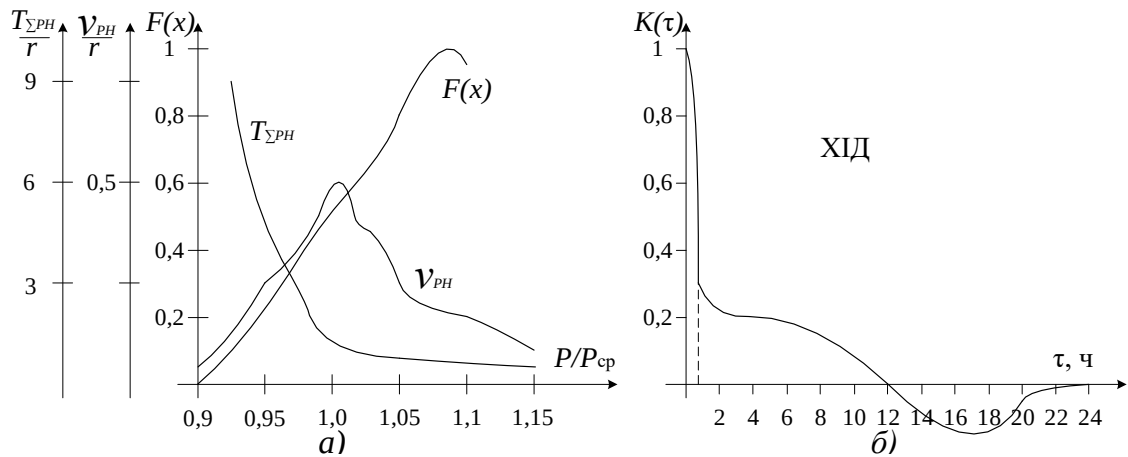


Рис. 3.3. Результати оцінювання експериментальних характеристик навантаження (а) і нормована кореляційна функція, розрахована на безлічі реалізацій (б)

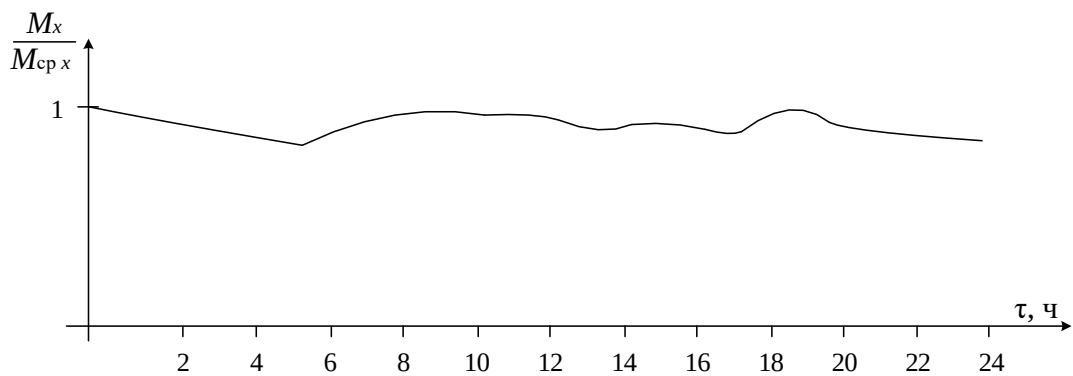


Рис. 3.4. Добові змінювання математичного очікування відносно середніх значень

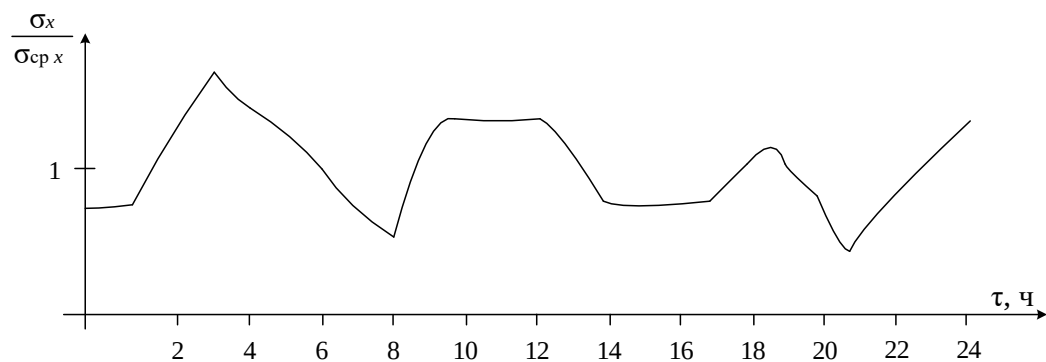


Рис. 3.5. Добові зміни стандартного відхилення відносно середніх значень

3.2. Вимірювання електроенергетичних параметрів САЕЕС на основі мультипліційної обробки гармонійних величин

Використання МП техніки у судновій електроенергетиці передбачає автоматизацію процесів управління, контролю й захисту СТС і К. Важливою і невід'ємною частиною кожного з цих процесів є вимірювання електроенергетичних параметрів, які, наприклад, необхідні для забезпечення ефективної автоматичної синхронізації ГА, а саме: величини і характеру струмів навантаження у всіх фазах, напруги, частоти струму, фазового кута φ зсуву між струмом і напругою, напрямку потужності й інших.

Відомо, що на сучасному морському судні більшість систем вимірювання електроенергетичних параметрів пов'язані з функціонуванням аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), і поряд із проблемою забезпечення надійності і точності, є проблема забезпечення необхідної швидкодії вимірів. Розв'язання цього завдання вимагає пошуку нових шляхів - на базі системного підходу з обліком відомих [14, 85-88, 243] цифрових способів вимірювання. У загальному виді завдання виміру параметрів електричної енергії у n -фазній системі пов'язане з визначенням безлічі величин $\{I_1, \dots, I_n, U_1, \dots, U_n, f, \varphi\}$ відповідно до обраного критерію швидкодії, де $I_1, \dots, I_n$ і $U_1, \dots, U_n$ амплітудні значення фазних струмів і лінійних напруг.

Як приклад, розглянемо трифазну систему, як найпоширеніший окремий випадок n -фазної системи. Для виміру параметрів електричної енергії у трифазній системі перетворимо, за допомогою формувачів прямокутних імпульсів, три лінійні (AB, BC, CA) напруги й три фазних (A, B, C) струму генератора у дискретні сигнали, що відображають півперіоди їх синусоїд. Послідовний, побайтний аналіз наборів станів вхідних сигналів дає можливість визначити закон (алгоритм) управління АЦП, на вхід якого надходять нормалізовані амплітудні значення повних струмів фаз і лінійних напруг генератора.

На рис. 3.6. наведені діаграми, що пояснюють сутність запропонованого способу виміру [1, 10, 14-16, 33].

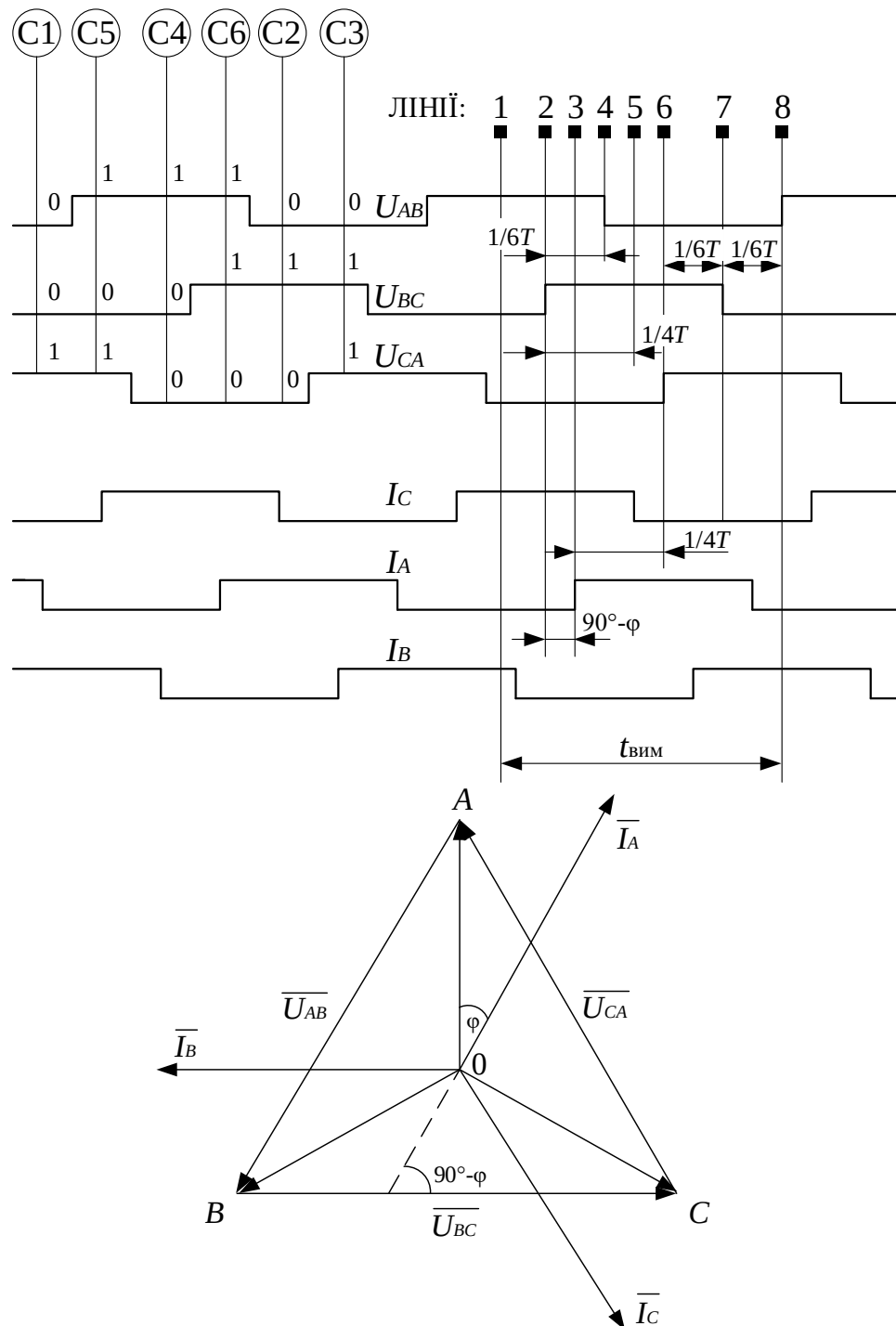


Рис. 3.6. Діаграми, що пояснюють спосіб багатомірного виміру параметрів електроенергії

нійні напруги генератора. Для n -фазної системи число можливих станів системи складе $C_{PLod} = 2n$ для непарного числа фаз і буде дорівнювати $C_{PLEv} = n$, якщо кількість фаз у системі парне. У свою чергу, число неможливих станів у n -фазній системі визначається вираженням $C_{ILod} = 2^n - 2n$ для непарного числа фаз і $C_{ILEv} = 2^n - n$ для парного. Оскільки система трифазна, то число можливих станів дискретних сигналів, що відображають півперіоди синусоїд,

буде дорівнювати шести. Однозначні набори 0–0–0 і 1–1–1 у симетричній трифазній системі неможливі. Можливі набори станів для послідовності чергування лінійних напруг U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} позначимо $C_1, \dots, C_6$ так, щоб порядковий номер стану збігався з його двійковим кодом, тобто $C_1 - 001$ ($U_{AB}=0$; $U_{BC}=0$; $U_{CA}=1$); $C_2 - 010$; $C_3 - 011$; $C_4 - 100$; $C_5 - 101$; $C_6 - 110$. Кожний стан визначає єдиний можливий за критерієм швидкодії шлях (алгоритм) розв'язання завдання виміру.

Наприклад, якщо вихідний стан – C_4 (на діаграмі це позначене лінією – 1), тому найближчим за часом є зміна стану біта U_{BC} . Тому програма виміру визначає момент переходу U_{BC} з «0» у «1» (лінія 2) і записує все вихідне слово, у якому маскуються всі біти, крім U_{BC} і I_A .

Аналіз значень цих битів дозволяє визначити напрямок потужності генератора. При цьому, якщо U_{BC} переходить:

$$\left. \begin{array}{l} \text{від 0 до 1, а } I_A = 0, \\ \text{від 1 до 0, а } I_A = 1 \end{array} \right\} - \text{генераторний режим; } \left. \begin{array}{l} \text{від 0 до 1, а } I_A = 1, \\ \text{від 1 до 0, а } I_A = 0 \end{array} \right\} - \text{руховий режим.}$$

Далі будемо робити відлік одиничних часових інтервалів від лінії 2 до моментів зміни стану бітів I_A і U_{BC} (лінії 3 і 4, відповідно). Отримані у такий спосіб цифрові коди дозволили визначити значення фазового куту φ і період T . У даному прикладі цифровий код інтервалу (лінія 2 – лінія 3) відповідає величині $(90^\circ - \varphi)$, а код інтервалу (лінія 2 – лінія 4) величині $1/6T$. Ця інформація дозволяє визначати моменти виміру амплітудних значень напруги U_{BC} і фазних струмів I_A, I_B, I_C (відповідно, на лініях 5, 6, 7, 8), що впливають один за одним інтервалом $\tau = 1/6T$.

Для випадку, наведеного на діаграмі, момент виміру амплітуди струму I_A визначається рівністю кількості відлічених одиничних часових інтервалів величині $1/4T + (90^\circ - \varphi)$ з моменту переходу U_{BC} з 0 у 1.

Отримані у такий спосіб цифрові коди, що відповідають поточним значенням I_A, I_B, I_C, U, f і φ дозволяють розрахувати активну – P , реактивну – Q і повну потужність по відомих залежностях: $P = UI \cos \varphi$, $Q = P \tan \varphi$, або

$Q = UI \sin \varphi$; $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, або $S = UI$, а також визначити ступінь нерівномірності їх розподілу за фазами (обрив, коротке замикання (КЗ), несиметричне навантаження і т. д.).

Для підвищення швидкодії виміру активної й реактивної потужності ГА відмовимося від операцій, пов'язаних з їх розрахунками за значеннями і фазою струму. Досягти цього можна формуванням імпульсу на вимір струму навантаження у момент зміни стану битів спеціально обраних напруг: для $I_A \rightarrow U_{BC}$; для $I_B \rightarrow U_{CA}$; для $I_C \rightarrow U_{AB}$. У цьому випадку (див. рис. 3.6), моменти виміру активних струмів будуть проводитися по лініях 2, 4, 6 відповідно для струмів I_A , I_B , I_C . Практична можливість застосування такого підходу залежить від швидкодії й принципу роботи АЦП.

Додатково розглянемо розв'язання завдання синтезу алгоритму управління процесом виміру. Вважаємо, що у МП-системі надання інформації про параметри (I_A , I_B , I_C , U , f і φ) здійснюється циклічно (з періодом $T_{ЦП}$) і пов'язана з управлінням і роботою АЦП. Із цієї причини ефективність запропонованого способу й структура управління процесом виміру будуть залежати від швидкодії й точності перетворення використовуваного АЦП, тобто у методі та елементної бази перетворення.

При розв'язанні завдання багатомірного виміру параметрів електроенергії (струмів, потужності, напруги й ін.), з міркувань економічності і згідно з обраними критеріями точності та швидкодії, принципово придатні АЦП із погрішністю від 0,05 до 1 % при максимальній частоті перетворення 30 МГц.

Особливістю програмної реалізації запропонованого методу є адаптація процесу виміру до: стану параметрів електроенергії на момент уведення інформації $C = \{C_1, \dots, C_n\}$ і часового інтервалу між моментом уведення C_i і початком його аналізу $t = \{t_1, \dots, t_n\}$, де $n = 1, 2, 3, \dots$. Завдання оптимізації у цьому випадку полягає у вказівці, яку альтернативу з $S = \{U_1, \dots, U_q\}$, де q – число таких альтернатив, слід реалізувати залежно від C и t . Це завдання вирішується правилом (алгоритмом) R_A :

$$U_i = R_A\{C, U_{i-1}, t\},$$

де $U_i, U_{i-1} \in S$. При цьому правило R_A вирішує завдання альтернативної оптимізації: за критерієм швидкодії U шляхом перевірки умов P_1, P_2 і P_3 для визначення стану C_i з набору $\{C_1, \dots, C_6\}$.

За встановленим станом C_i альтернативні управління U_i уводять до алгоритму потрібний набір умов для виконання процесу обробки інформації, а сама архітектура алгоритму при цьому залишається незмінною. Ураховуючи викладене, алгоритм програми виміру параметрів електроенергії ГА $PRMP$, записаний мовою ЛСА, зводиться до наступного вираження:

$$\begin{aligned}
 PRMP = & S_{II}.A_1.P_1 \overset{2}{\uparrow} P_2 \overset{3}{\uparrow} P_3 \overset{1}{\uparrow} \omega \overset{9}{\uparrow} \downarrow U_1 \omega \overset{10}{\uparrow} \downarrow P_2 \overset{5}{\uparrow} \omega \overset{6}{\uparrow} \downarrow P_3 \overset{4}{\uparrow} U_2 \omega \overset{10}{\uparrow} \downarrow U_3 \omega \overset{10}{\uparrow} \downarrow P_3 \overset{9}{\uparrow} \\
 & \omega \overset{8}{\uparrow} \downarrow P_3 \overset{6}{\uparrow} U_4 \omega \overset{7}{\uparrow} \downarrow U_5 \omega \overset{10}{\uparrow} \downarrow U_6 \omega \overset{10}{\uparrow} \downarrow A_2 \omega \overset{25}{\uparrow} \downarrow MR_I \overset{10}{\uparrow} MR_{II} \overset{19}{\uparrow} A_3.A_5 \downarrow MR_{III} \overset{11}{\uparrow} A_8 \downarrow \\
 & MR_{IV} \overset{12}{\uparrow} A_{10}.A_{11}.A_{12} \downarrow P_{13} \overset{13}{\uparrow} \downarrow A_6 \downarrow PC_I.A_{17}.PC_{II}.A_{17}.PC_{III} \omega \overset{25}{\uparrow} \downarrow MR_{IV} \overset{11}{\uparrow} A_{10}. \\
 & A_{11} \downarrow MR_{III} \overset{17}{\uparrow} A_8.A_{12} \downarrow A_6.A_{18} \omega \overset{15}{\uparrow} \downarrow A_4.A_5 \downarrow MR_{IV} \overset{20}{\uparrow} A_{10}.A_{11} \downarrow MR_{II} \overset{21}{\uparrow} A_9.A_{13} \\
 & \omega \overset{18}{\uparrow} \downarrow MR_{II} \overset{22}{\uparrow} A_7 \downarrow MR_{IV} \overset{20}{\uparrow} A_{10}.A_{11} \downarrow P_{14} \overset{23}{\uparrow} \omega \overset{24}{\uparrow} \downarrow S_K
 \end{aligned}$$

де S_{II} і S_K – початковий і кінцевий оператори; P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 і P_6 – перевірка умов $U_{AB} = 0$; $U_{BC} = 0$; $U_{CA} = 0$; $U_{AB} = 1$; $U_{BC} = 1$ і $U_{CA} = 1$, відповідно; $P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}$ і P_{12} – перевірка умов $I_A = 0$; $I_B = 0$; $I_C = 0$; $I_A = 1$; $I_B = 1$ і $I_C = 1$, відповідно; P_{13} і P_{14} – перевірка умов рахування $N_{CT} = 1/4T + (90^\circ - \varphi)$ і $N_{CT} = 1/4T + \varphi$, відповідно; $U_1 - U_6$ оператори управління записом умов стану параметрів у відповідні комірки пам'яті, наведені у таблиці 3.1; A_1 – оператор уведення цифрового коду напруг $U_{AB} - U_{BC} - U_{CA}$; A_2 – видача аварійного сигналу "Порушено чергування фаз"; A_3 і A_4 – реєстрація станів "Генераторний режим роботи ГА" і "Руховий режим роботи ГА", відповідно; A_5 і A_6 – оператори початку й зупинки рахування, відповідно; A_7, A_8, A_9, A_{10} – оператори запису у пам'яті значень φ ; $90^\circ - \varphi$; $180^\circ - \varphi$ і $1/6T$, відповідно; A_{11} – розрахунки значення $T_1, 1/2T, 1/4T$; A_{12} і A_{13} – розрахунки значення " φ " за формулами $\varphi = 1/4T - (90^\circ - \varphi)$ і $\varphi = 1/2T - (180^\circ - \varphi)$, відповідно; A_{14}, A_{15} і A_{16} – вимір I_A, I_B і I_C , відповідно; A_{17} і A_{18} витримки часу $\tau = 1/6T$ і $\tau = 1/4T$, відповідно; ω – безумовний перехід.

Таблиця 3.1 - Оператори управління записом умов стану параметрів у відповідні комірки пам'яті

Комірка Оператор	<i>MRI</i>	<i>MRII</i>	<i>MRIII</i>	<i>MRIV</i>	<i>PCI</i>	<i>PCII</i>	<i>PCIII</i>
<i>U₁</i>	<i>P₄</i>	<i>P₉</i>	<i>P₁₂</i>	<i>P₃</i>	<i>A₁₆</i>	<i>A₁₅</i>	<i>A₁₄</i>
<i>U₂</i>	<i>P₆</i>	<i>P₈</i>	<i>P₁₁</i>	<i>P₂</i>	<i>A₁₅</i>	<i>A₁₄</i>	<i>A₁₆</i>
<i>U₃</i>	<i>P₂</i>	<i>P₁₀</i>	<i>P₇</i>	<i>P₄</i>	<i>A₁₄</i>	<i>A₁₆</i>	<i>A₁₅</i>
<i>U₄</i>	<i>P₅</i>	<i>P₇</i>	<i>P₁₀</i>	<i>P₁</i>	<i>A₁₄</i>	<i>A₁₆</i>	<i>A₁₅</i>
<i>U₅</i>	<i>P₃</i>	<i>P₁₁</i>	<i>P₈</i>	<i>P₅</i>	<i>A₁₅</i>	<i>A₁₄</i>	<i>A₁₆</i>
<i>U₆</i>	<i>P₁</i>	<i>P₁₂</i>	<i>P₉</i>	<i>P₆</i>	<i>A₁₆</i>	<i>A₁₅</i>	<i>A₁₄</i>

У таблиці позначено: *MRI* – *MRIV* комірки пам'яті для запису відповідних умов; *PCI* – *PCIII* – комірки пам'яті для запису амплітудних значень фазних струмів згідно з алгоритмом.

Перетворення алгоритму для виміру параметрів електричної енергії у *n*-фазній системі не викликає утруднень, якщо враховувати зміну кількості станів у системі і зміну кутів між фазами при обчисленні частоти й амплітудних значень напруг і струмів. Таким чином, запропонований спосіб багатомірного виміру параметрів електроенергії ГА, можна вважати мультипліційною обробкою дискретно-аналогової інформації гармонійних величин. Така обробка дає можливість за час, що не перевищує один період синусоїдальної напруги, виміряти: амплітудні значення струмів навантаження у всіх фазах; лінійну напругу; фазовий кут навантаження; частоту струму; напрямок потужності.

Висновки до розділу 3

У розділі розглянуті особливості інформаційно-вимірювальної підтримки при технічній реалізації різноманітних САУ складними СТС і К.

1. Запропоновано і обґрунтовано доцільність використання принципу автоматизованого виміру і контролю навантаження у суднових ЕЕС на основі імовірнісного підходу.

2. Визначено, що наявність погрешностей пристроїв виміру й контролю приводить до специфічних помилок, які слід враховувати при оцінці якості контролю й розв'язанні завдань управління СТС і К. Розрізнено помилки першого і другого роду, що визначають імовірність неправдивого показання (спрацьовування аларма) і імовірність пропуску реєстрації переходу параметрів X граничного значення, відповідно.

3. Зв'язано вимірювані параметри X з генерованою потужністю у ходовому режимі I -паралельно працюючих генераторних агрегатів, зміна яких повинна контролюватися між верхніми X_{PH} і нижніми X_{PD} порогами завантаження. Для цього прикладу, на основі визначення добових коливань математичного очікування відносно середніх його значень і добових змін стандартного відхилення відносно його середніх значень, запропоновано використання інтегрального закону розподілу навантаження, визначені гістограми навантаження і апроксимація нормальним розподілом. У результаті наведені результати оцінювання експериментальних характеристик навантаження генераторних агрегатів і нормована кореляційна функція, розрахована на безлічі реалізацій режимів.

4. Запропоновано процедуру вимірювання електроенергетичних параметрів САЕЕС на основі мультипліційної обробки гармонійних величин. Доведено, що така обробка дає можливість за час, що не перевищує один період синусоїдальної напруги, вимірювати із заданою точністю: амплітудні значення струмів навантаження у всіх фазах, лінійну напругу, фазовий кут навантаження, частоту струму і напрямок потужності.

РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ БАЗОВИХ АЛГОРИТМІВ ВИЩОГО РІВНЯ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИХ СТС І К

4.1. Семантика і декомпозиція реалізованих завдань управління складними СТС і К

Як показано у попередніх розділах, дослідження СТС і К, як об'єктів управління і автоматизації, завершується одержанням семантичної інформації про об'єкти у вигляді вимог до обсягу функцій АСУ і створення переліку завдань управління. Ясно, що чим більше є наявної апіорної інформації про об'єкти, тим повніше і точніше відтворюються властивості об'єкта. Досягається це певною надмірністю інформації, наявністю конкретних даних, параметрів і т.д. Для опису завдань і функцій управління застосовуємо первинну й вторинну семантичну інформацію [86-88, 109-112, 209]. Одержання вторинної семантичної інформації [109-112] розглядаємо як продовження пізнання об'єкта, що полягає: а) у виявленні найбільш стійких і характерних ознак; б) у результатах аналітико-синтетичного й логічного перетворення первинної семантичної інформації, що відбивається за допомогою знаків. Тому ціль – розробка такої знакової системи (тезауруса), щоб позначення дескрипторів у ній несли не тільки значення навантаження, але й полегшували б читання модельної семантичної інформації ЛМС [76, 188, 189].

У зв'язку із цим у позначеннях основних дескрипторів вводимо знаки міжнародного позначення і індексування елементів САЕЕС і технологічного процесу, наприклад, *ST* (*start*), *SP* (*stop*), *STQ* (*start-quickly*), *EM* (*emergency*) і т.д. Для виділення й формування інформації із приналежності користуємося безліччю допоміжних знаків, розташовуваних щодо кореня дескриптора $\varepsilon = (N, i, j, l...)$, де $N = \{N_{BAS}\}$ – безліч натуральних нумерацій N_{BAS} , у яких дескриптор *BAS* позначає базис (основу) нумерації. Наприклад, $N_m = \overline{1, m}$ – нумерація безлічі ГА $GA(N_m) = \bigcup_{i=1}^m GA(i)$; m – агрегатної СЕЕС; i, j – кожного з номерів безлічі. Дескриптори можуть включати подвійну нумерацію, на-

приклад, $EM(i, j), i \in N_m, j \in N_{TRD}$, що позначає сигнал про аварію ГА з i -тим порядковим номером за j -м параметром. Повна безліч аварійних сигналів у такому випадку буде позначатися $EM(N_m \times N_{TRD})$. Запропонований тезаурус поповнюється дескрипторами у міру розв'язання завдань, окремі дескриптори уведені у текст вимог до АСУ, які сформульовані у вигляді наступних цілей (4.1.1–4.1.9.4).

4.1.1. У САЕЕС для кожного ГА $GA(i) \in GA(N_m), |Nm| = m$, передбачені три режими, які задаються за допомогою посту управління:

$AUT(i) \in AUT(Nm)$ – автоматичний;

$REM(i) \in RE(Nm)$ – дистанційний; $MNL(i) \in MNL(Nm)$ – ручний.

Для завдання команд на пуск і зупинку при дистанційному управлінні повинні бути передбачені кнопки:

$ST(i) \in ST(N_{ST}); STQ(i) \in STQ(N_{STQ}); SPQ(i) \in SPQ(N_{SPQ}); SP(i) \in SP(N_{SP})$

на пуск, екстрений пуск, екстрений стоп, стоп, відповідно, причому $|N_{ST}| = |N_{STQ}| = |N_{SP}| = |N_{SPQ}| = |N_{GA}| = m$. Для скидання аварійних сигналів – кнопка RST , а для включення/відключення автоматичного розподілу навантажень – кнопка $STSH/CLSH$. Для завдання черговості включення/відключення ГА передбачено кнопковий пристрій $SQ(i) \in SQ(N_{SQ})$, а для завдання мінімально припустимої кількості працюючих ГА у режимі – перемикач $MIN(l) \in MIN(N_{MIN})$, де $l \in N_{MIN}$ – число, що показує мінімально припустиму кількість ГА у режимі. Для ВГ на пульті передбачені, крім $ST(i)$, $SP(i)$, задавач режиму синхронізації $SY(i, l)$ "ВГ синхронізується до мережі" і $SY(l, i)$ "Мережа синхронізується до ВГ".

4.1.2. Система управління забезпечує підтримку резервних ДГ у готовності до пуску шляхом забезпечення теплового режиму й періодичного прокачування мастила. Передбачена можливість завдання оператором періоду й тривалості прокачування.

4.1.3. У системі передбачено програмне корегування заданій $SQ(N_{SQ})$ черговості включення/відключення ДГ, що враховує аварійні стани ДГ і керуючі впливи від оператора за допомогою пульта.

4.1.4. Програма управління режимами роботи СЕЕС виконує автоматичний вибір складу ГА (відповідно до заданих критеріїв оптимізації) в умовах мінливих навантажень, параметрів навколишнього середовища і технічного стану агрегатів. Команда на пуск резервного ГА при верхніх порогах завантаження має затримку 1...10 хв, що налаштовується $TD(ST)$.

4.1.5. Система забезпечує програмне управління процесами пуску $PRST$, синхронізації $PRSY$ і розподілу навантаження $PRSH$ у режимі введення ДГ, а також автоматичну синхронізацію й переклад навантаження у режимі введення валогенератора, $PRUNL$. У програмі управління процесом розподілу навантажень передбачена можливість завдання безперервного, циклічного й епізодичного режиму, а часові уставки $SHCT$ циклічної програми налаштовуються. Наприклад: пауза від 30 до 60 хв і робота 1...10 хв. Програмою передбачено автоматичне скидання паузи циклу при зміні складу працюючих ГА, а також при порушенні заданого закону розподілу навантажень.

Тривалість процесів пуску $TM(ST)$ і синхронізації $TM(SY)$ контролюється й має можливість налаштування від 10 до 180 с. При невдалій синхронізації ДГ $EM(i,SY)$, останній зупиняється, як несправний агрегат. При невдалій синхронізації валогенератора формується попереджувальний аварійний сигнал.

4.1.6. Система забезпечує автоматичне виконання операцій по виведенню ГА із складу працюючих шляхом розвантаження $PRUNL$ з відключенням від шин ГРЩ і наступною зупинкою первинного двигуна $PRSP$ при:
а) зниженні сумарного навантаження СЕЕС до граничного значення $PD(I)$;
б) некритичному відхиленні контрольованого параметра $NSR(i)$ і наявності достатнього резерву генерованої потужності. Процес перекладу навантаження контролюється по заданій величині $SWGOP$, наприклад, не більш $(0,1 P_H)$ і часу $SWGOT$, наприклад, від (1 до 180 с). Передбачена можливість налаштування інтенсивності скидання навантаження $UNLS$. Якщо, ГА що відключа-

ється не скине навантаження у заданому часовому інтервалі, то формується сигнал на відключення його автоматичного вимикача *SWG OFF*.

4.1.7. Система забезпечує автоматичну зупинку ДГ при невдалому процесі введення його у роботу або при відключенні його електричними захистами, а також екстрену автоматичну зупинку при подачі сигналів від оператора (*SPQ*), або небезпечному (критичному) відхиленні контрольованих параметрів *CR(i)*.

Передбачена можливість завдання часової затримки на екстрену зупинку *ESTD* від 1 до 10 с за граничними значеннями таких параметрів, як тиск і температура мастила та охолоджуючої води, параметрів вихлопних газів, зворотної потужності, низької/високої напруги й частоти.

4.1.8. Передбачено програмоване управління включенням потужних споживачів з попередньою оцінкою генерованої потужності.

4.1.9. У системі передбачене блокування включення резервних ГА при коротких замиканнях на шинах ГРЩ і формування управління на включення гасіння поля генераторів, що перебувають під коротким замиканням.

На кожному ДГ агрегаті передбачені інформаційні джерела.

4.1.9.1. Датчики аналогових сигналів, що визначають: фазні струми ГА *AMP(N_m,N_I)*, *N_I* – нумерація фаз; лінійні напруги *VLT(N_m,N_U)*, *N_U* – нумерація лінійних напруг; струм збудження *IEX(N_m)*; температура охолоджуючої прісної води (0...160 °C) *WTT(N_m)*; температура мастила (0...160 °C) *LBT(N_m)*; температура вихлопних газів (0...900 °C) *GST(N_m)*; температура мастила, що надходить у підшипник ГА (0...160 °C) *BRT(N_m)*; опір ізоляції обмотки ГА (0...100 МОм) *ISL(N_m)*; частота обертання ГА *TAH(N_m)*; положення рейки паливних насосів *FLRK(N_m)*; витрата палива (0...1000 л/г) *FLRT(N_m)*.

4.1.9.2. Датчики дискретних сигналів: занадто великі оберти *OVS(N_m)*; немає тиску мастила *LBP2(N_m)*; немає циркуляції охолодної води *WTP2(N_m)*; низький тиск мастила *LBP1(N_m)*; висока температура мастила *LBT(N_m)*; висока температура охолоджуючої води *WTH(N_m)*; висока температура відпрацьованих газів *GSH(N_m)*; низький тиск пускового повітря *AIRL(N_m)*; витік палива

$FLLK(N_m)$; висока температура підшипника генератора $BRH(N_m)$; задимленість вихлопних газів (неповне згоряння палива) – $FMFL(N_{GA})$.

4.1.9.3. Датчики дискретних сигналів, що відображають періоди синусоїд: лінійної напруги мережі, лінійних/фазних напруг і струмів генератора.

4.1.9.4. Сигналізатори виконавчих органів: насос прокачування мастила у роботі $PLBW(N_m)$; тиск мастила у нормі $PLBP(N_m)$; повільне провертання у нормі $SLTR(N_m)$; клапан системи підігріву відкритий $WTWRM(N_m)$; клапан заборотної води закритий $WTVLV(N_m)$; клапан пускового повітря відкритий $STVLV(N_m)$; робочий стоп пристрій включений $SPWRK(N_m)$; автоматичний вимикач ГА включений $SWGON(N_m)$; секційний вимикач включений $SCON(N_{SC})$.

Сформульовані цілі (4.1.1–4.1.9.4) управління з інформаційним забезпеченням і аналіз вимог міжнародних класифікаційних товариств відносно структури, функцій і компонентів САЕЕС дозволив у дисертаційному дослідженні виконати декомпозицію завдань управління.

Як приклад, результати декомпозиції завдань управління СЕЕС зведені у таблицях 4.1, 4.2 та 4.3.

Таблиця 4.1 - Декомпозиція завдань управління СЕЕС

Функція управління	Завдання, розв'язувані у процесі управління
1. Управління СЕЕС у нормальних, аварійних і передавальних режимах	1.1 Узгодження рівнів генерованої потужності й потужності, необхідної у теперішній момент часу. 1.2 Перехід від одного рівня генерованої потужності до іншого з урахуванням критеріїв ефективності. 1.3 Управління складом ГА з обліком передавальних і аварійних станів СЕЕС і керуючих впливів від оператора. 1.4 Організація послідовності включення/ відключення ГА з урахуванням аварійних станів ГА й керуючих впливів від оператора.

Таблиця 4.2 - Декомпозиція завдань управління
дизель-генераторним агрегатом

Функція управління 1	Завдання, розв'язувані у процесі управління 2
1. Управління гарячим резервом	1.1. Обробка сигналів від перемикача, що задає вид управління (автомат./ручн.) мастилопрокачуванням, клапана підігріву мастила, датчика тиску мастила. 1.2. Формування циклів мастилопрокачування з корегованими (змінюваними оператором) часовими інтервалами. 1.3. Формування й контроль виконання сигналів на вмик./вимик. насоса мастилопрокачування. Реєстрація аварійних сигналів "Немає прокачування", "Немає прогріву".
2.1. Управління процесом пуску	2.1.1. Обробка сигналів, що надходять від локального координатора, кнопок "Пуск", "Екстрений пуск", "Стоп", "Екстрений стоп", від датчиків положення рейки, тиску мастила, температури мастила, повільного провертання, датчика частоти обертання, блок-контакту генераторного автомата. 2.1.2. Формування (змінюваних оператором) часових інтервалів контролю: вдалого пускового прокачування мастила; повільного провертання; включення клапану повітря; відключення (паузи при багаторазових спробах пуску) клапана пускового повітря; включення серводвигуна регулятора; зняття блокування за тиском мастила; екстреного пуску; квітірування; вдалого збудження. 2.1.3. Формування й контроль виконання сигналів на вмик./вимик.: насоса мастилопрокачування; серводвигуна регулятора; робочого стоп-пристрою; пристрою повільного провертання; пускового клапану; розблокувань генераторного автомата. 2.1.4. Формування сигналів процесу пуску й АПС: "Пуск", "Екстрений пуск", "Несправність", "Немає пуску", "Немає прокачування", "Немає обертів", "Готовий прийняти навантаження", "Прогрівається", "Синхронізується", "Навантаження включене", "Аварія".

Продовження табл. 4.2

1	2
3. Управління процесом зупинки	3.1. Обробка сигналів, що надходять від локального координатора, кнопок "Стоп", "Екстрений стоп", від датчиків частоти обертання, положення рейки паливних насосів, генераторного автоматичного вимикача. 3.2. Формування змінюваних (оператором) тимчасових інтервалів контролю: включення робочого стоп-пристрою, включення режиму екстреної зупинки. 3.3. Формування й контроль виконання сигналів на відключення генераторного автомата, включення робочого стоп-пристрою, вкл./откл. серводвигуна, закриття клапанів охолодження забортної й прісної води. 3.4. Формування сигналів процесу зупинки й АПС: "Стоп", "Екстрений стоп", "Несправність", "Немає стопа", "Гарячий резерв включений", "Дизельне паливо", "Аварія". 3.5. Формування попереджувальної сигналізації від датчиків: Тиск мастила; Тиск води; Температура мастила; Температура води; Температура вихлопних газів; Перевантаження; Розрив паливних труб; Наявність стружки у мастилі; Вода у колекторі; Тиск пускового повітря.
4. Управління захистом та блокуванням	4.1. Обробка сигналів від вимикача "Захист відключений" та кнопки "Скидання". 4.2. Організація часових затримок і формування сигналів захистів: - від надвеликих обертів дизеля без затримки; - від втрати тиску мастила із затримкою 0–15 с; - від втрати циркуляції охолоджуючої води із затримкою 0–15 с; - від підвищення температури охолоджуючої води із затримкою 0–30 с; - від зворотної потужності з регульованим встановленням потужності 0–15 % від номінальної потужності P_n і часу спрацьовування 0–15 с; - від перевантаження за повним струмом з регульованим встановленням струму 0–1,5 від I_n і витримкою часу, що відповідає часо-струмовій характеристиці; - від обриву фази й неправильного чергування фаз; - від відхилення напруги з регульованим встановленням відхилення (від 0,01 до 70 %) та витримкою часу від 0,01 до 15 с; - від відхилення частоти до 10 % від номінального значення й витримкою до 15 с. 4.3. Формування узагальненого сигналу "Аварія" і сигналу, що розшифровує тип аварії. 4.4. Блокування пуску при спрацьовуванні захистів.

Продовження табл. 4.2.

1	2
5. Управління процесом синхронізації	5.1. Вимір і контроль напруги синхронізованого ГА. 5.2. Вимір і контроль частоти синхронізованого ГА. 5.3. Формування сигналів на припасування частоти синхронізованого ГА. 5.4. Розрахунки часу випередження включення генераторного вимикача. 5.5. Розрахунки інтенсивності зміни частоти синхронізованого ГА. 5.6. Реалізація оптимального управління процесом синхронізації за критерієм швидкодії й мінімуму погіршеності вимірювань.
6. Управління процесом виміру параметрів електроенергії	6.1. Реалізація багатомірного способу виміру параметрів електроенергії: - вимірювання частоти; - вимірювання амплітудних і діючих значень лінійних напруг трифазної мережі; - вимірювання куту навантаження; - вимірювання напрямку потужності; - вимірювання амплітудних і діючих значень фазних струмів навантаження трифазної мережі.

Таблиця 4.3 - Декомпозиція завдань управління валогенераторним агрегатом

Функція управління	Завдання, розв'язувані у процесі управління
1	2
1. Управління процесами уведення/виведення ВГ	1.1. Обробка сигналів, що надходять від локального координатора, від датчиків положення муфти, частоти обертання ГД, блок-контакту генераторного автомата, кнопок "Пуск" ("Зачеплення муфти ВГ"), "Стоп" ("Роз'єднання муфти ВГ"). 1.2. Контроль процесів зачеплення й роз'єднання муфти ВГ. 1.3. Формування й контроль виконання сигналів на вмик./вимик. клапанів зачеплення й роз'єднання муфти ВГ. 1.4. Формування сигналів процесу уведення/виведення АПС "Пуск", "Стоп", "Немає стопу", "Муфта у зачепленні", "Муфта роз'єднана", "Готов прийняти навантаження", "Синхронізація", "Навантаження включене", "Несправність", "Аварія", "Тиск робочого мастила муфти ВГ", "Температура обмоток ВГ".

На наступних етапах дослідження, з урахуванням виконаної декомпозиції завдань і цілей управління, проводиться пошук їх раціональних рішень.

4.2. Синтез алгоритмів програми управління супервізора координатора

Керуємося принципами і методологією побудови АСУ СЕЕС, сформульованими вище, а також методами опису, запропонованими у [10-13, 15-17]. У якості об'єкта управління приймемо СЕЕС, що містить три ДГ і один ВГ, розглядаючи її, як перспективний варіант комплектації САЕЕС.

Спираючись на результати робіт [1, 2, 18, 19, 26, 31-33], виберемо у якості системи управління багатомашинну МП-систему з розподіленою дво-рівневою ієрархічною структурою, рис. 4.1.

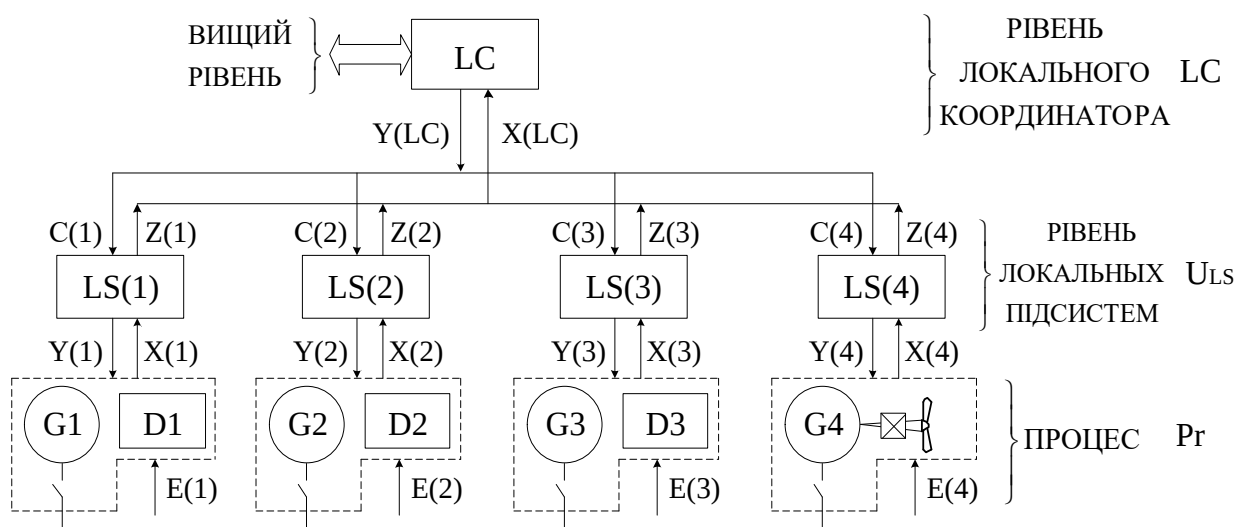


Рис. 4.1. Структура і інформаційні зв'язки системи управління

На нижньому рівні (рівень локальних підсистем $U_{LS}(i)$, $i \in \overline{1,4}$) у кожній $LS(i)$ підсистемі визначимо розв'язання таких завдань як: організація вибірки й введення даних процесу (INP); вимір робочих параметрів ГА і параметрів електроенергії (MS); формування аварійно-попереджувальних сигналів (EM) і відеоінформації (VD); управління гарячим резервом (HRS); управління процесами пуску (ST), зупинки (SP), синхронізації (SY), захистами й блокуваннями (BP) свого ГА, виконання команди на розподіл (SH) або скидання (UNL) навантаження.

Верхньому рівню (рівень локального координатора LC) визначимо завдання, пов'язані з оптимізацією процесів управління й адаптацією електроенергетичної системи у нормальних і аварійних режимах СЕЕС. При цьому

глобальне завдання відповідно до принципу зосередження функцій [249] повинно бути спрямоване на забезпечення гарантованого електропостачання найбільш можливої якості у всіх режимах.

Декомпозиція й розв'язання завдання синтезу системи уніфікованих алгоритмів, визначені принципом зосередження [249]. Тому тут це завдання сформулюємо у вигляді узагальненої результатної функції:

$$RF(N(a) \rightarrow N(b)) \cong R(OVL, UDL, EM, SQ, MIN, D) \rightarrow \\ \rightarrow (WR : ST(k), SP(l), SH(i, k), UNL(i, k)),$$

тобто перехід від складу $N(a)$ паралельно працюючих ГА до складу $N(b)$ визначається обчислювальною функцією R , у результаті розв'язання якої LC формує (WR – записує) такі команди, як пуск (ST) k -го, зупинка (SP) l -го ГА, розподіл навантажень $SH(i, k)$ між i -м і k -м ГА або скидання (переклад) $UNL(i, k)$ навантаження з i -го на k -й ГА. Аргументами функції R є предикати, істинність яких має місце: при досягненні навантаження САЕЕС верхньої (OVL) або нижньої (UDL) межі; при аварійному (EM) стані окремого або групи ГА; певної послідовності (SQ) включення/відключення ГА у певному обмеженні за мінімально припустимою кількістю ГА у режимі (MIN), а також додаткових вимог (D).

З урахуванням вимог до досліджуваних систем автоматизації [1, 2, 18, 19, 26, 31-33, 200, 201, 250, 251] слід зазначити, що клас жорстко запропонованих принципом зосередження функцій управління повинен бути доповнений властивостями адаптації й оптимізації. Тому при визначенні поточного значення верхнього порога завантаження САЕЕС доцільно передбачити вплив метеорологічних умов плавання судна [13, 14]. Практичний досвід експлуатації показує [17, 22, 23, 27-35], що гранично-припустиме навантаження ДГ багато у чому залежить від температури, тиску й вологості навколишнього середовища. У зв'язку із цим, при оцінці порогу завантаження (OVL), доцільно вводити корекцію, використовуючи, наприклад, залежності [252] К. Ціннера. Більших переваг у плані підвищення техніко-економічних показників САЕЕС можна добитися управлінням співвідношення власних

параметрів ДГ [31-33, 253, 254], вирішуючи завдання, пов'язані із забезпеченням мінімуму витрати палива й зношування окремих деталей, зниженням інтенсивності нагару та ін. У цьому ж плані представляється ефективним застосування алгоритмів діагностування параметрів [131, 133, 134], що володіють досить високим рівнем інформативності, це температура газів по циліндрах $TG(i)$, поточне значення питомої витрати палива $FL(i)$, положення рейки паливних насосів $RK(i)$ та інші. Зіставляючи ці параметри, можна контролювати справність паливної апаратури, визначати стан ГА і можливість експлуатації його у зонах, близьких до загороджувальних характеристик, підвищуючи у такий спосіб коефіцієнт використання дизеля [30, 32, 34]. У загальному виді управління, що реалізує функції оптимізації й адаптації до змінюваних умов експлуатації САЕЕС, можна представити результатною функцією:

$$RF(OPT) \cong R(PW(i), FL(i), RK(i), TG(i), K(i), D) \rightarrow (WR : PH(i), SH(i), DOP),$$

тобто оптимальний режим роботи САЕЕС визначається у процесі аналізу обчислювальної функції R , що дає можливість знайти оптимальний верхній поріг завантаження кожного ГА $PH(i)$, здійснити раціональний розподіл навантажень між ГА $SH(i)$, а також видати операторові повідомлення й рекомендації DOP .

Розглянемо завдання, пов'язані з розробкою інформаційної моделі й алгоритмічного забезпечення, уводячи наступні правила функціонування: $S = U_{LS}(i) U_{LC}, i \in \overline{1,4}$ – об'єднання чотирьох локальних підсистем ЛП $LS(i)$ і одного локального координатора ЛК LC ; $LS(i) : X(i) \times C(i) \rightarrow Y(i)$ відображення, що визначає виробітку управлінь $Y(i)$ на i -й ГА шляхом обробки безлічі входних сигналів $X(i)$, що надходять у ЛП у процесі виконання програм, а також координаційних команд $C(i)$, що надходять у ЛП від ЛК; $X(LC) = Z_1 \times Z_2 \times Z_3 \times Z_4$, $Y(LC) = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4$ – декартові добутки безлічі входів в $X(LC)$ і керуючих сигналів $Y(LC)$ від ЛК відповідно; $PS = U_{PS}(i), i \in \overline{1,4}$, об'єднання підпроцесорів ЛП; $PS(i) = Y(i) \times E(i) \rightarrow X(i)$ – відображення підпроцеса, як перетворювача керуючих впливів $Y(i)$ і зовніш-

ніх збурювань $E(i)$ у поточному $t+1$ такті технологічного циклу у сигнали $X(i)$; $\exists C \exists Y(PS(Y, D(LS)) \& PS(C, D(LC)))$ висловлення з умов принципу сумісності завдань ЛП $D(LS)$ зі глобальними завданнями ЛК $D(LC)$.

Оскільки структура досліджуваної системи є ієрархічною й розподіленою [80-84], тому періодичний вид обслуговування для неї буде найбільш прийнятним. Організацію такого виду обслуговування уведемо у перелік завдань програм супервізора, як для ЛП, так і для ЛК. У якості способу організації його оберемо спосіб з перериванням періоду дискретності $T_{\text{ТЦ}}$, при якому супервізор у кожному новому $t+1$ такті повинен проаналізувати вхідну інформацію, що з'явилась у такті t , визначити шлях переходу процесу у новий стан, або продовжити його виконання, або зберегти поточний стан.

Таким чином, першочерговим завданням встає завдання синтезу системи функціональних алгоритмів супервізора, яке є далеко нетривіальним для СТС і К і вимагає детальної верифікації.

Перший етап верифікації виконаємо за допомогою орієнтованих графів станів, рис. 4.2, які дозволяють досить наочно й компактно відобразити сукупності станів підсистем $LS(i)$ і координатора LC :

$$LS(N_{\text{ЛП}} \times N_{\text{LS}}) = U_{\text{LS}}(i, j), i \in N_{\text{ЛП}}, j \in N_{\text{LS}}; LC(N_{\text{LC}}) = U_{\text{LC}}(i), i \in N_{\text{LC}},$$

де $N_{\text{ЛП}} = \overline{1,4}$ – нумерація ЛП; $N_{\text{LS}} = \overline{0,12}$ або $N_{\text{LS}} = \overline{0,9}$ – нумерації станів локальних процесів для ДГ або ВГ відповідно; $N_{\text{LC}} = \overline{1,18}$ нумерація станів процесів САЕЕС.

Для ЛП ДГ, рис. 4.2, а, позначені номери станів мають наступне значення: 0 – стоянка, заблокований; 1 – стоянка, готовий до пуску; 2 – пуск; 3 – прогрів; 4 – готовий до приймання навантаження; 5 – синхронізується; 6 – розподіл навантажень; 7 – працює один; 8 – паралельна робота; 9 – скидання навантаження; 10 – вибіг; 11 – відключений від шин, нормальна зупинка; 12 – синхронізується під навантаженням; 13 – відключений від шин через аварію.

Для ЛП ВГ, рис. 4.2, б, номери станів означають: 0 – роз'єднаний і загальмований; 1 – уводиться у зачеплення; 2 – готовий до приймання наванта-

ження; 3 – синхронізується до мережі; 4 – мережа синхронізується до ВГ; 5 – переклад навантаження на ВГ; 6 – робота під навантаженням; 7 – скидання навантаження; 8 – відключений від шин, аварія; 9 – вивід із зачеплення.

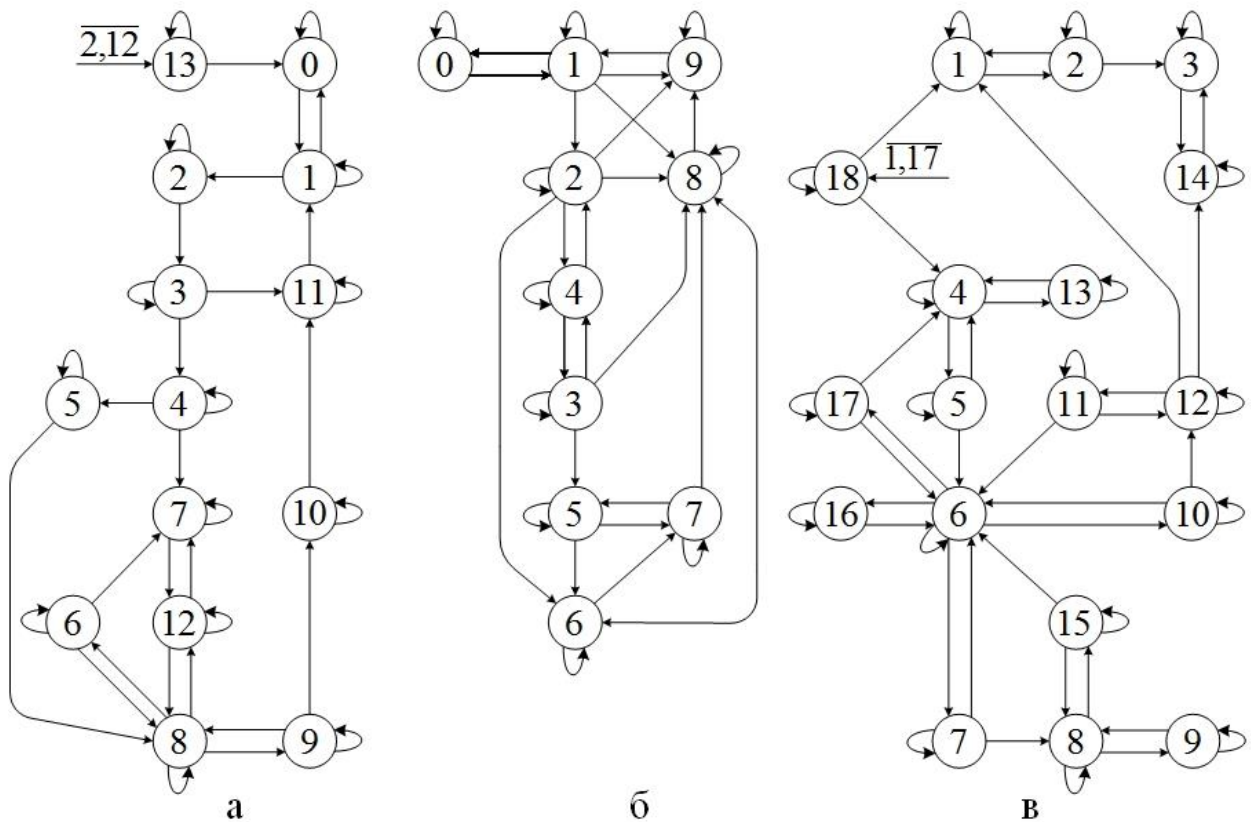


Рис. 4.2. Графи стану локальних підсистем і координатора

Для ЛК САЕЕС, рис. 4.2, в, мають місце стани: 1 – працює один ВГ; 2 – ДГ синхронізується до ВГ; 3 – переклад навантаження від ВГ на ДГ; 4 – працює один ДГ; 5 – до i -го ДГ синхронізується k -й; 6 – паралельна робота двох ДГ; 7 – до двох ДГ синхронізується третій; 8 – паралельна робота трьох ДГ; 9 – розподіл навантажень між трьома ДГ; 10 – до двох ДГ синхронізується ВГ; 11 – скидання навантаження від ВГ на два ДГ; 12 – скидання навантаження з двох ДГ на ВГ; 13 – ВГ синхронізується до ДГ; 14 – скидання навантаження з одного ДГ на ВГ; 15 – переведення навантаження з третього ДГ на два інших ДГ; 16 – розподіл навантажень між двома ДГ; 17 – переведення навантаження з одного ДГ на іншій; 18 – знеструмлення.

Слід зазначити, якщо граф станів САЕЕС, рис. 4.2, в, скласти з урахуванням фізичних номерів ДГ (тобто № 1, № 2 та № 3), то для його опису тре-

ба було б 51 стан. Якщо поставити умову, за якою програма черговості (SQ) буде встановлювати відповідність між порядковим номером (i, k, l) ГА у черзі (тобто за логічним номером i за фізичним номером), то для опису процесів САЕЕС достатньо 18 станів.

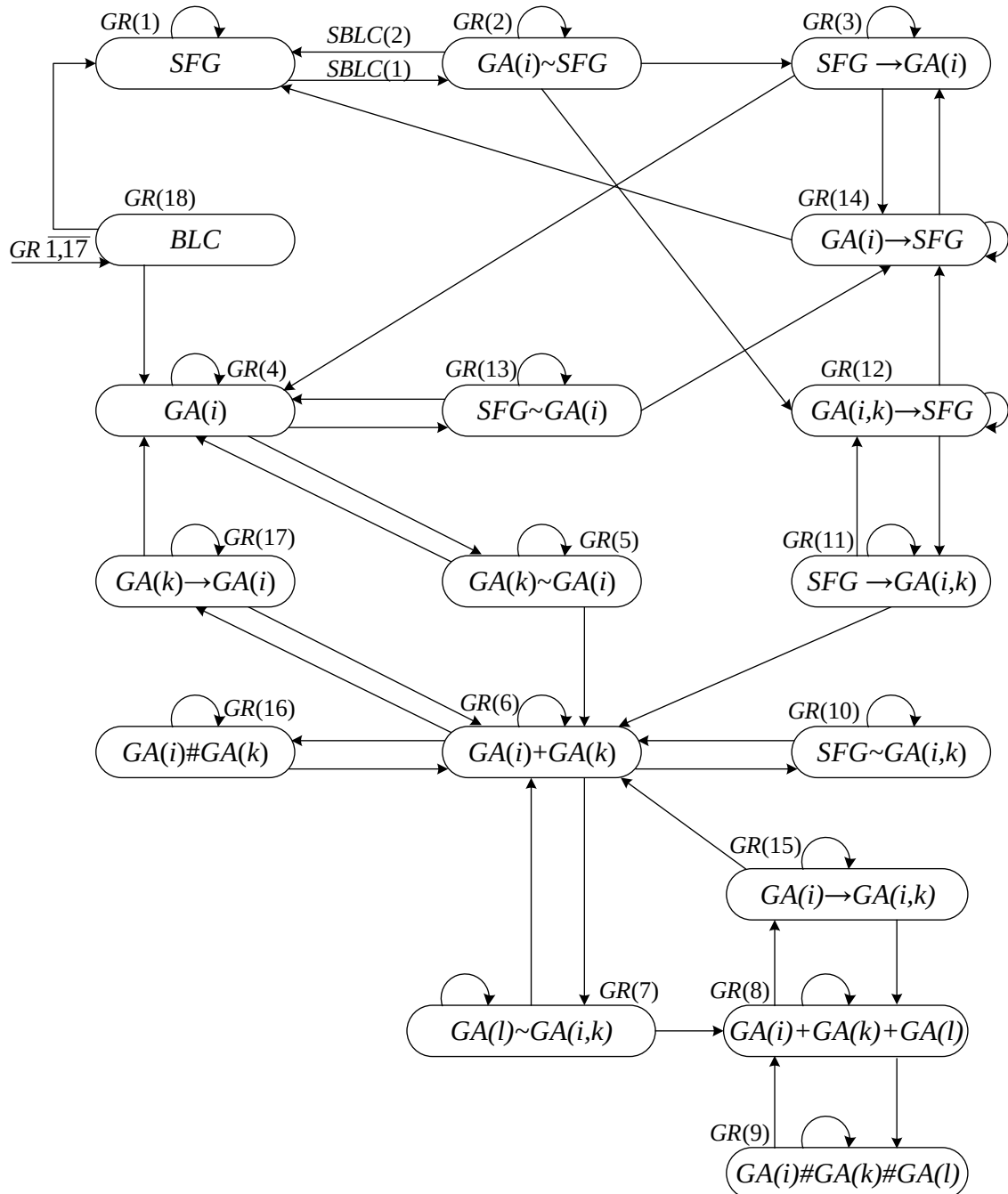


Рис. 4.3. Граф стану СЕЕС

Для наочності пропонованого методу синтезу, представимо граф станів СЕЕС $GR(N_{GR})$, так, як показано на рис. 4.3, де SFG і $GA(i)$, $GA(k)$, $GA(l)$ поз-

начення ВГ і ДГ відповідно, а знаки $\sim$, $\rightarrow$, $\#$, $+$, показують процеси синхронізації SY , перекладу UNL навантаження, розподілу SH навантаження й паралельної роботи відповідно; BLC – стан знеструмленої СЕЕС.

Граф $GR(N_{GR})$ є повністю заданим, оскільки його вершини пронумеровані $-N_{GR} = \overline{1.18}$. Він відноситься до класу неоднорідних, тому що ступені його вершин не рівні; містить 50 ребер і 18 петель, ступінь усього графу становить $k = 68:18 \approx 3,8$.

Кожна вершина $GR(i) \in GR(N_{GR})$, $i \in N_{GR}$ зіставлена із цілком певним предикативним станом $LC(i) \in LC(N_{LC})$, де N_{GR} і N_{LC} нумерації, зв'язані взаємно однозначною відповідністю $|N_{GR}| = |N_{LC}| = 18$. Таким чином, якщо, наприклад, у СЕЕС валогенератор синхронізується до i -го ДГ, то тільки один предикат $LC(13) = I$ повинен бути дійсним, а інші неправильними. Тут під терміном "предикативні стани" будемо розуміти систему предикатів, позбавлених парадоксів у тому розумінні, що кожний стан повинний описуватися відмінно від іншого, бути повним і не суперечливим набором-словом ознаки, а для встановлення стану STS повинен існувати цілком певний алгоритм $SBLC(i) \in SBLC(N_{LC})$.

Для опису слів-ознак станів $SIGNLC(i)$, $i \in N_{LC}$ повинен бути сформований алфавіт предикатів. Робоче середовище й структура каналу вираховання, що відображають процес і породження предикатів, аналогічні розглянутим раніше. Частину предикативної абетки можна скласти, виходячи з вимог, завдань і функцій керуючої системи, як це виконане раніше. Для одержання ж повної абетки (алфавіту) не існує якого-небудь формального методу, тому його визначення здійснюється у міру синтезу слів-ознак і далі системи алгоритмів, коли з'являється необхідність усунути протиріччя у опису слів-ознак шляхом введення нових предикатів.

Приступимо до синтезу безлічі $USIGNLC(i)$ слів-ознак станів СЕЕС й алгоритмів їх встановлення. Перший стан $LC(1)$ поставимо у відповідність режиму, коли в САЕЕС під навантаженням працює тільки один ГА (позна-

чимо цю умову $WRK(1)=I$ і при тому валогенератор ($LS(4,6)=I$)), до якого не синхронізується жоден ДГ ($MSY(i) \neq I$). Із цього випливає, що алгоритм встановлення $SBSTS(LC(1))$ стану $LC(1)$ повинен звернутися спочатку до підпрограми $SBCNT$ підрахунку кількості підключених до ГРЩ ГА, що породжує предикати $WRK(N_{WRK})$, $N_{WRK} = \overline{0,4}$ і одержати значення предиката $WRK(1)$. Потім одержати значення $LS(4,6)$, яке посилає в кожний такт обміну інформацією локальна підсистема $LS(4)$, що обслуговує валогенератор, рис. 4.1 і рис. 4.2, б, і, нарешті, значення предиката, що відображає наявність пам'яті синхронізації MSY , яку формує локальний координатор за запитом нижньої ЛП, якщо який-небудь ДГ готовий до синхронізації. Отримав значення предикатів $\{WRK(1), LS(4,6), MSY\}$, програма $PRSTS(LC(1))$ тепер може встановити істинність стану $LC(1)$, якщо даному набору задати (за Марковим) внутрішню систему координат за допомогою функціональних (операційних) імен алгебри логіки:

$$SIGNLC(1) = WRK(1) \& LS(4,6) \& \overline{MSY}(i). \quad (4.1)$$

У цьому випадку алгоритм підпрограми $SBSTS(LC(1))$ встановлення стану $LC(1)$ зводиться до наступного правила:

$$\begin{aligned} & \text{while } SBLC(1) \text{ do } SBCNT \text{ if } WRK(1) \& LS(4,6) \& \overline{MSY}(i) \\ & \text{then } WR:LC(1) \text{ else fi od} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Це ж правило з використанням мови результатних функцій має вигляд:

$$RFLC(1) \cong (WRK(1) \& LS(4,6) \& \overline{MSY}(i)) \rightarrow LC(i) \quad (4.3)$$

Запис (4.2) є більш виразним і змістовним, чим (4.3), тому що у ньому явно запропоноване виконання підпрограми $SBCNT$, у той час як у результатній (4.3) функції ця підпрограма задана у неявному виді: “Прагнеш одержати значення предиката $WRK(1)$? Звернися до підпрограми $SBCNT$ ”. Однак, запис (4.3) є більш компактним.

Способи синтезу підпрограми $SBCNT$ розглядаються у 4.3. Другий стан $LC(2)$ повинен характеризуватися такою ж парою предикатів $WRK(1)$, $LS(4,6)$, як і $LC(1)$, але крім того повинні мати місце ознаки того, що є рішення на зу-

пинку валогенератору (предикат пам'яті на зупинку ВГ є дійсним, $MSP(4)=I$, а локальна підсистема i -го ДГ $LS(i)$ виконує процес синхронізації, тобто $LS(i,5)=I$, причому час, відведений на успішну синхронізацію, ще не вичерпано, тобто предикат $TSY \neq I$. Виходячи із цього, повне слово ознаки стану $LC(2)$ буде мати вигляд:

$$SIGNLC(2) = WRK(1) \& LS(4,6) \& MSP(4) \& MSY(i) \& \overline{TSY} .$$

Породження предикатів $MSP(4)$, $MSY(i)$, $TSY(i)$ віднесемо до функції підпрограми супервізора (диспетчера) $SBSVRLC(1)$, що забезпечує як контроль стану $LC(1)$, так і умови переходу CAEEC у стан $LC(2)$. Звідси випливає, що $SBLC(1) \in SBSVRLC(1)$, а оскільки $|N_{LC}| = 18$, тому повна програма супервізора локального координатора $PRSVR(LC)$ є об'єднанням

$$PRSVR(LC) = \bigcup_{i=1}^{18} SBSVRLC(i) .$$

Розглянемо процедуру синтезу підпрограми супервізора $SBSVRLC(1)$, використовуючи результатні функції й ЛСА.

Будемо вважати, що перехід від $LC(1)$ до $LC(2)$ може бути ініційований командою оператора $SP(4, t+1) = I$ на зупинку ВГ у поточний $t+1$ такт часу або автоматично - при виникненні аварії $EM(4, t+1)=I$, що вимагає заміни ВГ резервним дизель-генератором. Причому програма супервізора повинна розрізняти критичний $CR(4)$ і некритичний $\overline{CR}(4)$ аварійний стан ВГ. У першому випадку вона повинна послати (записати – WR) команду на екстрений $MSTQ(i)$ пуск, а у другому на нормальний $MST(i)$ пуск резервного ДГ, якщо СЕЕС має у своєму розпорядженні резерв $YSR=I$. При відсутності резерву $NTR=I$ рішення відсилається до оператора $DOP=I$. Команди $MST(i)$ або $MSTQ(i)$ надходять у режимі обміну даними у локальну підсистему $LS(i)$ програми, що здійснює пуск. У наступні такти $T_{\text{тц}}$ технологічних циклів, супервізор координатора повинен контролювати процес пуску на заданому числом $B(ST) = t_{\text{доп}}^{ST} / T_{\text{тц}}$ часовому інтервалі. Цим приписанням будуть задовольняти наступні результатні функції:

$$RFLC(1,1) \cong LC(1) \& \overline{MSP}(4,t) \& (SP(4,t+1) \vee EM(4,t+1) \&$$

$\& \overline{CR}(4)) \& YSR \rightarrow WR : MSP(4), MST(i), B(ST), MEM \text{ if } EM(4);$
 $RFLC(1,2) \cong LC(1) \& \overline{MSP}(4,t) \& EM(4,t+1) \& CR(4) \& YSR \rightarrow$
 $\rightarrow WR : MSP(4), MSTQ(i), B(STQ), MEM(CR);$
 $RFLC(1,3) \cong LC(1) \& (SP(4,t+1) \vee EM(4) \vee MSP(4,t) \vee MEM(4)) \&$
 $\& NTR \rightarrow WR DOP$

Якщо ж після закінчення $t_{\text{доп}} (TST=I)$ за результатами обміну інформації з i -ю локальною підсистемою встановлене, що резервний, ГА не досяг стану "Готовий до приймання навантаження", тобто $LS(i,4) \neq I$, то при наявності наступного резерву $YSR=I$ координатор повинен сформулювати команду $MST(k)$ на запуск чергового резерву:

$RFLC(1,4) \cong LC(1) \& MSP(4,t) \& (MST(i) \oplus MSTQ(i)) \& TST \&$
 $\& \overline{LS}(i,4) \& YSR \rightarrow WR : MST(k) \oplus MSTQ(k), B(ST) \oplus B(STQ);$
 $RFLC(1,5) \cong LC(1) \& MSP(4,t) \& TST \& \overline{LS}(i,4) \& NTR \rightarrow WR : DOP.$

При вдалому запуску резерву $LS(i,4)=I$ супервізор повинен послати на адресу $LS(i)$ дозвіл на синхронізацію $MSY(i)=I$, і записати число $B(SY)$, рівнозначне припустимому часу синхронізації $B(SY) = t_{\text{доп}}/T_{\text{ТЦ}}$, а також зареєструвати новий $LC(2)$ стан процесу:

$RFLC(1,6) \cong LC(1) \& MSP(4,t) \& LS(i,4) \rightarrow WR : MSY(i), B(SY), LC(2).$

Отримані результатні функції синтезуємо за допомогою ЛСА у вигляді наступного алгоритму підпрограми $SBSVRLC(1)$ супервізора:

$SBSVRLC(1) = S_{\Pi} \cdot \{SBINP.SBCNT\} \cdot LC(1) \overset{1}{\uparrow} MSP(4,t) \overset{2}{\uparrow} (MST(i) \vee MSTQ(i)) \overset{3}{\uparrow}$
 $TST \overset{k}{\uparrow} \overset{5}{\downarrow} YSR \overset{4}{\uparrow} \overset{7}{\downarrow} WR : ST(k), B(ST) \cdot \overset{k}{\omega} \overset{4}{\uparrow} \overset{4}{\downarrow} WR : NTR, DOP \cdot \overset{k}{\omega} \overset{3}{\uparrow} \overset{3}{\downarrow} LS(i,4) \overset{5}{\uparrow}$
 $WRLC(2).WRMSY(i).WRB(SY) \cdot \overset{k}{\omega} \overset{2}{\uparrow} \overset{2}{\downarrow} SP(4,t+1) \overset{6}{\uparrow} \overset{4}{\uparrow} YSR \overset{4}{\uparrow} WR : MSP(4), \overset{7}{\omega} \overset{7}{\uparrow}$
 $\overset{6}{\downarrow} EM(4,t+1) \overset{k}{\uparrow} CR(4) \overset{5}{\uparrow} YSR \overset{4}{\uparrow} WR : STQ(i), B(STQ), MSP(4) \cdot \overset{k}{\omega} \overset{1}{\uparrow} \overset{1}{\downarrow} PRCLS \overset{k}{\downarrow} S_K$

де $PRCLS$ – програма пошуку дійсного стану у випадку, коли ознаки поточного стану не відповідають еталонному $SIGNLC(1)$, тобто $LC(1) \neq I$. Структура $PRCLS$, отримана на основі добору станів "за жеребом"; $SBINP$ – підпрограма уведення даних, строго погоджена у часі з потоком обміну даних. Правила обміну між рівнями системи встановимо так, як показано на рис. 4.4.

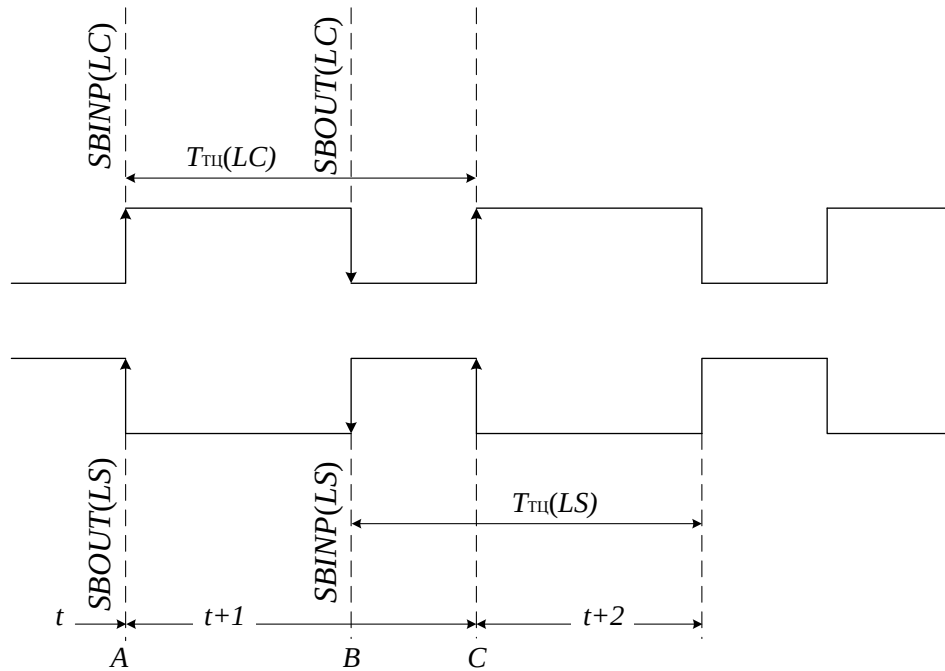


Рис. 4.4. Пояснення до вироблення правил обміну даними між підсистемами

У момент часу t_A , з настанням нового $t+1$ технологічного циклу координатора $T_{Ц}(LC)$, підсистеми нижнього рівня працюють у режимі введення $SBINP(LC)$. Потім, після закінчення часу t_{AB} роботи підпрограми супервізора $SBSVRLC(i)$, координатор передає дані підпрограми $SBOUT(LC)$ у локальні підсистеми, у яких у момент t_B наступає час нового технологічного циклу. Час t_{BC} відповідає часу виконання підпрограми $SBSVRLS(i)$ супервізора локальної підсистеми і т. д.

З графу (рис. 4.3), випливає, що для стану $LC(2)$ встановлено два переходи – один у $LC(1)$, другий $LC(3)$. Перший пов'яжемо із ситуацією, коли необхідність у зупинці ВГ відпала й оператор зняв команду на зупинку $MSP(4,t+1) \neq I$, і до цього часу ДГ ще не встигнув підключитися $WRK(1) = I$. У цьому випадку, якщо ВГ справний $MEM(4) \neq I$, супервізор $SBSVRLC(i)$ повинен послати команду на зупинку $GA(i)$, $SP(i) = I$, що приведе $LS(i)$ у стан $LS(i,11)$. Якщо ж $GA(i)$ підключиться, наприклад, у момент обміну інформацією, то супервізор $PRSVRLS(i)$ локальної підсистеми приведе $LS(i)$ у стан $LS(i,9)$, що дає підставу супервізору координатора, за допомогою програми $PRCLS$, зафіксувати стан $LC(14)$.

Умові переходу $LC(2) \rightarrow LC(1)$ поставимо у відповідність результатну функцію:

$$RFLC(2,1) \cong LC(2) \& ST(4,t+1) \& \overline{MEM}(4,t+1) \vee \overline{LC}(2) \& N(1) \& SWG(4) \& \overline{LS}(i,5) \rightarrow WR : SP(i), LC(1); CL : MSY(i), MSP(4); WR : DOP \text{ if } MEM(4,t+1),$$

де $SWG(4)$ предикат, дійсний, якщо ВГ підключений до шин; CL – операція стирання пам'яті. Другий перехід $LC(2) \rightarrow LC(3)$ закінчується у момент підключення $GA(i)$ до шин $SWG(i)=I$. У цьому випадку супервізор локальної підсистеми повинен викликати прикладну програму розподілу навантажень $PRSH$ і зареєструвати стан $LS(i, 6)$. Одержавши у такті обміну даними цю інформацію, підпрограма $SBSVRLC(2)$ повинна зареєструвати стан $LC(3)$, стерти пам'ять синхронізації $CLSY$ і послати на адресу процесу локальної підсистеми валогенератора $LS(4)$ команду на скидання навантаження $MUNL(4,i)$, а також приступити до контролю цього процесу у часі $B(UNL)$. Отже, слово ознаки стану буде мати вигляд:

$$SIGNLC(3) = WRK(2) \& SWG(4) \& LS(i,6) \& MUNL(4,i).$$

Переведення навантаження з ВГ і назад ставиться до досить відповідального процесу, з погляду можливого переходу ВГ у руховий режим, і, як наслідок, великого перевантаження ДГ. Тому локальна підсистема валогенератора $LS(4)$ повинна бути забезпечена прикладною програмою контролю скидання навантаження $PRUNL(4,i)$, що забезпечує відключення ВГ від шин при досягненні певного (як правило, 10 % від P_H) рівня навантаження ВГ.

Якщо, за технічними умовами, забезпечена можливість управління (корегування) обертовим моментом валогенератора, то програма $PRUNL(4,i)$ зможе виконувати не тільки функції контролю, але й управляти процесом скидання. А якщо можливості зміни моменту не має, то управління організує програма $PRSH(4,i)$ у $LS(i)$, а контроль - $PRUNL(4,i)$ у $LS(4)$.

Контролювання процесу перекладу навантаження повинне проводитися з метою підвищення надійності енергопостачання, як координатором у часі, так і підсистемою $LS(4)$. Причому, координатор повинен у випадку невдалого скидання навантаження $TUNL=I$ спрацювати на оповіщення оператора, а

$LS(4)$ після закінчення відведеного часу, залежно від значення навантаження, що залишилося, посилає команду на відключення валогенератора від шин.

Крім того, у системі повинен бути передбачений надійний захист по переходу ВГ у руховий режим із адаптивною часовою затримкою на відключення залежно від величини зворотної потужності. З обліком викладеного алгоритму контролю переходу $LC(2) \rightarrow LC(3)$, поставимо у відповідність результату функцію:

$$RFLC(2,2) \equiv \overline{LC}(2) \& WRK(2) \& SWG(4) \& LS(i,6) \& MSP(4) \rightarrow \\ \rightarrow WR : MUNL(4,i), BUNL, LC(3); CL : MSY(i,4)$$

Синтезуючи, за допомогою ЛСА функції $RFLC(2,1)$ і $RFLC(2,2)$, одержимо другу підпрограму супервізора координатора:

$$SBSVRLC(2) = S_{\Pi} \cdot \{SBINP.SBCNT\}.SIGNLC(2) \overset{1}{\uparrow} ST(4,t+1) \overset{2}{\uparrow} MEM(4) \overset{3}{\uparrow} \\ WR : DOP_{\omega} \overset{k}{\uparrow} \overset{3}{\downarrow} CL : MSY, MSP(4).WR : MSP(i), LC(1). \omega \overset{k}{\uparrow} \overset{2}{\downarrow} SY \overset{k}{\uparrow} WR : \\ EM(SY), DOP_{\omega} \overset{k}{\uparrow} \overset{1}{\downarrow} WRK(2) \& SWG(4) \& LS(i,6) \overset{4}{\uparrow} WR : MUNL(4,i), B(UNL), \\ LC(3); CL : MSY(i,4) \omega \overset{k}{\uparrow} \overset{4}{\downarrow} PRCLS \overset{k}{\downarrow} S_K,$$

де за допомогою операції $WR : EM(SY)$, уведена умова реєстрації невдалої синхронізації з оповіщенням операторові. У цьому випадку система не повинна вживати оперативних дій, пов'язаних із зупинкою справного дизель-генератора, тому що невдала синхронізація може бути через некерованість валогенератора (хвилювання моря, сильно знижена частота) і т. д.

Для остаточного висвітлення методу й особливостей синтезу окремих модулів програми супервізора координатора розглянемо синтез підпрограми $SBSVRLC(6)$, що обслуговує режим паралельної роботи двох дизель-генераторів. Як видно з рис. 4.3, граф у вершині $GR(6)$, відповідний до цього режиму, досягає максимального ступеня. Аналізуючи напрямки шляхів переходу графа з вершини $GR(6)$, встановлюємо, що алфавіт слова ознаки стану $LC(6)$ повинен складатися з таких предикатів, як: до шин підключено два ДГ $WRK(2)=I$ і обидва ДГ перебувають у стані паралельної роботи, тобто

$LS(i,8)=I$ и $LS(k,8)=I$; необхідності у вирівнюванні навантажень між генераторами немає $TSH(i,k) \neq I$, тобто:

$$SIGNLC(6) = WRK(2) \& LS(i,8) \& LS(k,8) \& \overline{TSH}(i,k).$$

Умови переходу у інші $LC(7)$, $LC(10)$, $LC(17)$, $LC(16)$ стани пов'язані зі зміною навантаження СЕЕС, а також з аварійними й передаварійними станами працюючих ДГ. Розв'язання завдань, пов'язаних з контролем завантаження СЕЕС й визначенням необхідної кількості $NR(Y,l)$, $l \in N_{NR}$, $N_{NR} = \overline{1,m}$ ГА накажемо спеціальній програмі $PRNR(Y)$. Метод і особливості її синтезу розглядаються у наступних параграфах дисертації. Програма $PRNR(Y)$ породжує предикати $NR(Y(1))=I$, якщо за навантаженням потрібний один ГА, $NR(Y(2))=I$, якщо треба два або $NR(Y(3))=I$, якщо треба три.

Виконання функції контролю технічного стану агрегатів накажемо підпрограмам їх локальних підсистем, синтез яких розглянутий у §4.2. Ці програми породжують предикати $MSP(i)$, $MSP(k)$, $MSPQ(i)$, $MSPQ(k)$. Перша пара предикатів може бути викликана некритичними аваріями або запитом оператора на зупинку, тобто вони не вимагають від координатора неодмінної зупинки. Інакше кажучи, остаточне рішення на зупинку у випадку MSP ухвалює координатор. Друга ж пара предикатів $MSPQ$ ставить координатор перед фактом екстреної зупинки (залежно від типу аварії) часову затримку.

Таким чином, постановка завдання наборів вимагає дослідження різних значень зі, як мінімум, сімох змінних. Повне число наборів складе 128, тобто побудова повністю детермінованого алгоритму, що здійснює перебір усіх, без винятку, наборів, приведе до дуже великої розмірності. Тому виникає завдання пошуку шляхів мінімізації числа переборів та одержання результатних функцій більш низьких розмірностей.

Першим кроком у цьому напрямку є виділення наборів, неможливих з погляду характеру технологічного процесу. Так, із трьох предикатів $NR(Y(1,3))$, за характером технологічного процесу, одночасно може бути дійсним тільки один предикат. Тому для синтезу алгоритму управління досить

розглянути три набори (001, 010, 100). Інші п'ять наборів (000, 110, 101, 011, 111) можна оголосити невірними, що виникають як результат збою (помилки) програми – *MIP*. Це, безумовно, є небажано і може привести в управлінні до непередбачених наслідків. Тому завдання розпізнавання неправильних наборів повністю виключати недоцільно.

Аналіз розглянутих наборів показує, що вони мають особливу властивість, а саме – непомилкові набори при застосуванні до них операції “виключна диз'юнкція” породжують дійсний предикат, а неправильні набори містять неправильний предикат (крім набору 111). Ця властивість дозволяє алгоритму розпізнавання *SBRCG* установити наступне правило функціонування:

$$\text{while } SBRCG \text{ do if } (NRY(1) \oplus NRY(2) \oplus NRY(3)) \& \\ \& (\overline{NRY(1)} \vee \overline{NRY(2)}) = 0 \text{ then } WR : MIP \text{ else fi od}$$

При проходженні предикату $MIP=I$ будь-які дії з автоматичного управління СЕЕС повинні бути припинені.

Розглянемо дане завдання при управлінні з урахуванням технічного стану ГА або запитів оператора. Це завдання описується чотирма предикатами $MSP(i)$, $MSP(k)$, $MSPQ(i)$, $MSPQ(k)$, що дають 16 варіантів для розгляду. З метою мінімізації алгоритму застосуємо метод оцінних функцій. Це дозволяє склеїти ряд варіантів, якщо вважати, що розв'язання завдання залежить не тільки від значень, але й від послідовності розгляду предикатів у наборі.

Задамо перебору предикатів певну послідовність: $MSPQ(i) \rightarrow MSPQ(k) \rightarrow MSP(i) \rightarrow MSP(k)$, а набори опишемо таблицею 4.4, групуючи їх за ознакою еквівалентних відповідей.

Таблиця 4.4 - Таблиця переборів станів предикатів

Предикати	Номер набору															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$MSPQ(i)$	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
$MSPQ(k)$	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$MSP(i)$	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
$MSP(k)$	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
$CASE(N_{CSE})$	CASE(1)				CASE(2)								CASE(3,4,5,6)			

У випадку $CASE(1)$, коли обидва працюючих ДГ вимагають екстреної зупинки ($MSPQ(i)=1$, $MSPQ(k)=1$), для кожного з чотирьох наборів повинна

бути відповідь: почати операції з введення у роботу резервного ДГ або готового до приймання навантаження ВГ. Значення предикатів $MSP(i)$ і $MSP(k)$ при цьому не враховуються, тому що вони будуть несуттєвими через перевагу $MSPQ(i \& k)$. Таким чином, розв'язання завдання у випадку $CASE(1)$ можна скоротити на чотири перебори, не враховуючи такі варіанти як:

$$MSP(i) \& MSP(k) \vee \overline{MSP}(i) \& MSP(k) \vee MSP(i) \& \overline{MSP}(k) \vee \overline{MSP}(i) \& \overline{MSP}(k),$$

якщо при цьому дійсним є висловлення $MSPQ(i) \& MSPQ(k)$, форму запису якого надалі, з метою скорочення, будемо представляти як $MSPQ(i \& k)$.

У випадку $CASE(2)$ пріоритетними є ті ж предикати, пов'язані з функцією $MSPQ(i) \oplus MSPQ(k)$. У цьому випадку відповідь не повинна залежати від значень $MSP(i)$ і $MSP(k)$, тому що в роботі повинен залишитися хоча б один ГА, навіть, якщо в нього некритична аварія. Таким чином, розв'язання завдання у випадку $CASE(2)$ скорочується на вісім переборів, якщо перед цим установлена істинність висловлення $MSPQ(i) \oplus MSPQ(k) \cong MSPQ(i \oplus k)$.

Інші випадки $CASE(3,4,5,6)$ відрізняються значеннями предикатів $MSPQ(i,k)$. Однак, для переходу до їхнього перебору необхідно, щоб пріоритетні предикати відповідали умові $\overline{MSPQ}(i) \& \overline{MSPQ}(k)$. Відповіді у всіх цих випадках сильно залежать від фактору завантаження СЕЕС й наявності резерву. З урахуванням виконаної мінімізації, опис $DSCR(SP, SPQ)$ даного завдання перебору зведемо до правила:

$$DSCR(SP, SPQ) \cong MSPQ(i \& k) \rightarrow MSPQ(i \oplus k) \rightarrow \overline{MSPQ}(i) \& \overline{MSPQ}(k) \& MSP(i \oplus k) \rightarrow MSP(i) \& MSP(k) \rightarrow \overline{MSP}(i) \& \overline{MSP}(k),$$

яке містить тільки сім переборів. У цьому випадку, опис усього завдання $DSCR(SP, SPQ)$ перебору, з урахуванням зміни навантаження, СЕЕС:

$$DSCR(SP, SPQ, NRY) \cong (NRY(1) \vee NRY(2) \vee NRY(3)) \& (MSPQ(i \& k) \rightarrow MSPQ(i \oplus k) \rightarrow \overline{MSPQ}(i) \& \overline{MSPQ}(k) \& MSP(i \oplus k) \rightarrow MSP(i) \& MSP(k) \rightarrow \overline{MSP}(i) \& \overline{MSP}(k))$$

тобто замість 128 наборів достатньо урахувати лише 21 набір.

Демонстрований цим прикладом запропонований метод оптимізації комбінаторного завдання, не відноситься до повністю формалізованого. Тобто, при визначенні порядку перебору доводиться виходити з міркувань, що базуються на вже переглянутих гіпотетичних розв'язаннях, заснованих евристикою. Однак ефективність методу укладена у тому, що він дозволяє швидко знайти розв'язання, близьке до екстремального.

З урахуванням отриманих розв'язань синтезуємо алгоритми підпрограми *SBSVRLC(6)*.

Оцінимо першу подію $EVNT(1) = CASE(1) \& NRY(1V2V3)$, зв'язану з випадком $CASE(1)$ і різними варіантами навантаження $NRY(1,2,3)$. Оскільки у резерві СЕЕС тільки два агрегати – ВГ і ДГ, що не можуть за технічними умовами працювати паралельно, то у цій ситуації вводити у роботу необхідно той ГА, який готовий $LS(4,2) \oplus LS(1,4)$ до прийняття навантаження. Однак, у випадках, коли обидва ГА готові, перевагу слід віддати валогенератору, здатному забезпечити все навантаження режиму. Таким чином, у випадку $CASE(1)$ розмірність предиката NRY можна не враховувати, тобто комбінаторне завдання спрощується на два перебори $EVNT(1)=CASE(1)$. Якщо ж готових до включення ГА не має, то при наявності справного резерву $YSR = I$ необхідно сформулювати команду $MST(I)$ на його запуск. Якщо ж резерву немає $NTR = I$, то ситуацію вирішує тільки оператор: *DOP*.

При другій події $EVNT(2) = CASE(2) \& NRY(1V2V3)$ екстрена зупинка потрібна тільки для одного ГА, тому тут потрібна докладна оцінка навантаження, щоб, у випадку можливого перевантаження $OVL(1) = I$, ГА залишився, запобігти цьому шляхом відключення частини споживачів *PRCNS* або включення накопичувачів електроенергії *PRACC*. Ці правила опишемо за допомогою таблиці обчислювальних підфункцій, $RFLC(6) = \bigcup_{i=1}^{32} RFLC(6,i)$, розташовувавши їх у порядку пріоритету за виконанням (див. табл. 4.5).

Таблиця 4.5 - Обчислювальні підфункції правил функціонування підпрограми

Позна- чення підфун- кцій	Вхідний словниковий ансамбль															Вихідна процедура
	<i>LC</i> (6)	<i>LS</i> (4,2)	<i>MSPQ</i> (<i>i</i> & <i>k</i>)	<i>LS</i> (<i>l</i> ,4)	<i>OVL</i> (1)	<i>MSTQ</i> (<i>l</i>)	<i>T</i> (<i>STQ</i>)	<i>MST</i> (<i>l</i>)	<i>YSR</i>	<i>MSPQ</i> (<i>i</i> ⊕ <i>k</i>)	<i>NRV</i> (1)	<i>MSP</i> (<i>i</i> ⊕ <i>k</i>)	<i>MSP</i> (<i>i</i> & <i>k</i>)	<i>NRV</i> (3)	<i>TST</i>	
<i>RFLC</i> (6,1)	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<i>WR:MSY</i> (4), <i>LC</i> (10), <i>S_K</i>
~ (6,2)	1	0	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<i>WR:PRCNS,MSY</i> (<i>l</i>), <i>LC</i> (7), <i>S_K</i>
~ (6,3)	1	0	1	1	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<i>WR:MSY</i> (<i>l</i>), <i>LC</i> (7), <i>S_K</i>
~ (6,4)	1	0	1	0	–	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	<i>WR:DOP, S_K</i>
~ (6,5)	1	0	1	0	–	1	0	–	–	–	–	–	–	–	–	<i>S_K</i>
~ (6,6)	1	0	1	0	–	0	–	1	–	–	–	–	–	–	–	<i>WR:MSTQ</i> (<i>l</i>), <i>B</i> (<i>STQ</i>), <i>S_K</i>
~ (6,7)	1	0	1	0	–	0	–	0	1	–	–	–	–	–	–	<i>WR:MSTQ</i> (<i>l</i>), <i>B</i> (<i>STQ</i>), <i>S_K</i>
~ (6,8)	1	0	1	0	–	0	–	0	0	–	–	–	–	–	–	<i>WR:DOP</i>
~ (6,9)	1	0	0	–	–	–	–	–	–	1	1	–	–	–	–	<i>WR:MSH</i> (<i>i</i>), <i>MUNL</i> (<i>k</i>), <i>LC</i> (17), <i>S_K</i>
~ (6,10)	1	0	0	1	1	–	–	–	–	1	0	–	–	–	–	<i>WR:MSY</i> (<i>l</i>), <i>LC</i> (7), <i>S_K</i>
~ (6,11)	1	0	0	1	0	–	–	–	–	1	0	–	–	–	–	<i>WR:MSY</i> (<i>l</i>), <i>LC</i> (7), <i>S_K</i>
~ (6,12)	1	0	0	0	–	1	1	–	–	1	0	–	–	–	–	<i>WR:DOP, S_K</i>
~ (6,13)	1	0	0	0	–	1	0	–	–	1	0	–	–	–	–	<i>S_K</i>
~ (6,14)	1	0	0	0	–	0	–	1	–	1	0	–	–	–	–	<i>WR:MSTQ</i> (<i>l</i>), <i>B</i> (<i>STQ</i>), <i>S_K</i>
~ (6,15)	1	0	0	0	–	0	–	0	1	1	0	–	–	–	–	<i>WR:MSTQ</i> (<i>l</i>), <i>B</i> (<i>STQ</i>), <i>S_K</i>
~ (6,16)	1	0	0	0	–	0	–	0	0	1	0	–	–	–	–	<i>WR:DOP, S_K</i>
~ (6,17)	1	0	0	0	0	0	–	–	–	0	1	1	–	–	–	<i>WR:MSH</i> (<i>i</i>), <i>MUNL</i> (<i>k</i>), <i>LC</i> (17)
~ (6,18)	1	0	0	1	–	–	–	–	–	0	0	1	–	–	–	<i>WR:MSY</i> (<i>l</i>), <i>LC</i> (7), <i>S_K</i>
~ (6,19)	1	0	0	0	–	–	–	1	–	0	0	1	0	–	1	<i>WR:DOP, S_K</i>
~ (6,20)	1	0	0	0	–	–	–	1	–	0	0	1	0	–	0	<i>S_K</i>
~ (6,21)	1	0	0	0	–	–	–	0	1	0	0	1	0	–	–	<i>WR:MST</i> (<i>l</i>), <i>B</i> (<i>ST</i>), <i>S_K</i>
~ (6,22)	1	0	0	0	–	–	–	0	0	0	0	1	0	–	–	<i>WR:DOP, S_K</i>
~ (6,23)	1	0	0	0	–	–	–	1	–	0	–	–	1	–	1	<i>WR:DOP, S_K</i>
~ (6,24)	1	0	0	0	–	–	–	1	–	0	–	–	1	–	0	<i>S_K</i>
~ (6,25)	1	0	0	0	–	–	–	0	1	0	–	–	1	–	–	<i>WR:MST</i> (<i>l</i>), <i>B</i> (<i>ST</i>), <i>S_K</i>
~ (6,26)	1	0	0	0	–	0	–	0	0	0	–	–	1	–	–	<i>WR:DOP, S_K</i>
~ (6,27)	1	0	0	0	–	–	–	–	–	0	1	0	0	–	–	<i>WR:MSH</i> (<i>i</i>), <i>MUNL</i> (<i>k</i>), <i>LC</i> (17), <i>S_K</i>
~ (6,28)	1	0	0	0	–	–	–	1	0	0	–	–	–	1	1	<i>WR:DOP, S_K</i>
~ (6,29)	1	0	0	0	–	–	–	1	–	0	–	–	–	1	0	<i>S_K</i>
~ (6,30)	1	0	0	0	–	0	–	0	0	0	–	–	–	1	–	<i>WR:DOP, S_K</i>
~ (6,31)	1	0	0	0	–	0	–	0	1	0	–	–	–	1	–	<i>WR:MST</i> (<i>l</i>), <i>B</i> (<i>ST</i>), <i>S_K</i>
~ (6,32)	1	0	0	0	–	–	–	–	–	0	0	0	0	0	–	<i>S_K</i>
~ (6,33)	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<i>WR:PRCLS, S_K</i>

Вищим пріоритетом наділяємо слово із предикатом *LS(4,2)* – “Валогенератор готовий до прийняття навантаження”, при якому обчислювальна підфункція *RFLC(6,1)* відкидає (не враховує) значення всіх інших предикатів (у табл. 4.5 це показане прочерком), оскільки ВГ самостійно здатний забезпечити режим роботи. З таблиці видно, що чим вищий пріоритет слова, тем менше букв входить у нього. Тому правомірно уважати словом найвищого пріо-

ритету $LC(6)=0$, коли підфункція $RFLC(6,33)$ відправляє програму-диспетчер до пошуку дійсного стану $PRCLS$.

Оскільки кожна підфункція повністю задана вхідним словом, і визначена вихідною процедурою, то здійснюючи їх синтез за допомогою ЛСА, одержимо шукану підпрограму $SBSVRLC(6)$:

$$\begin{aligned}
 SBSVRLC(6) = S_{\Pi} \{ & SBCNT.SBNRY \} LC(6) \overset{1}{\uparrow} LS(4,2) \overset{2}{\uparrow} WR : MSY(4), LC(10). \\
 & \omega \overset{k}{\uparrow} \overset{2}{\downarrow} MSPQ(i \& k) \overset{3}{\uparrow} \overset{12}{\downarrow} LS(l,4) \overset{4}{\uparrow} OVL(1) \overset{5}{\uparrow} PRCNS \overset{5}{\downarrow} WR : MSY(l), LC(7). \omega \overset{k}{\uparrow} \\
 & \overset{4}{\downarrow} MSTQ(l) \overset{6}{\uparrow} T(STQ) \overset{k}{\uparrow} \overset{8}{\downarrow} WR : DOP \omega \overset{k}{\uparrow} \overset{6}{\downarrow} MST(l) \overset{7}{\uparrow} \overset{9}{\downarrow} WR : MSTQ(l), B(STQ) \\
 & \omega \overset{k}{\uparrow} \overset{7}{\downarrow} YSR \overset{8}{\uparrow} \omega \overset{9}{\uparrow} \overset{3}{\downarrow} MSPQ(i \oplus k) \overset{10}{\uparrow} NRY(1) \overset{12}{\uparrow} \overset{15}{\downarrow} WR : MSH(i), MUNL(k), LC(17). \\
 & \omega \overset{k}{\uparrow} \overset{10}{\downarrow} MSP(i \oplus k) \overset{13}{\uparrow} NRY(1) \overset{14}{\uparrow} \overset{15}{\downarrow} LS(l,4) \overset{16}{\uparrow} \overset{5}{\uparrow} \overset{16}{\downarrow} MST(l) \overset{17}{\uparrow} T(ST) \overset{k}{\uparrow} \overset{8}{\uparrow} \overset{17}{\downarrow} YSR \\
 & \overset{8}{\uparrow} WR : MST(l), B(ST). \omega \overset{k}{\uparrow} \overset{13}{\downarrow} MSP(i \& k) \overset{18}{\uparrow} MST(l) \overset{17}{\uparrow} T(ST) \overset{k}{\uparrow} \overset{8}{\uparrow} \overset{18}{\downarrow} NRY(1) \overset{19}{\uparrow} \\
 & \overset{15}{\uparrow} \overset{19}{\downarrow} NRY(3) \overset{k}{\uparrow} \overset{17}{\uparrow} \overset{1}{\downarrow} PRCLS \overset{k}{\downarrow} S_K,
 \end{aligned}$$

де $SBCNT$ і $SBNRY$ – відповідно підпрограми визначення кількості задіяних ГА й визначення потрібного числа ГА у поточному режимі. Особливості синтезу цих підпрограм розглядаються у §4.3.

4.3. Розв'язання завдання координованого управління СЕЕС при змінах навантаження

Відповідно до вимог, сформульованих у §4.1, управління складом ГА при зміні навантаження повинно здійснюватися шляхом: вибору резерву $PRSEL$, формуванням команд на запуск $ST(i)$ (при досягненні навантаженням верхнього порогу $PH(l)$ завантаження для l паралельно працюючих ГА) або зупинку $SP(i)$ (при досягненні нижнього порогу $PD(l)$) резервних ГА згідно з діючою черговістю $SQ(i) \in SQ(N_{SQ})$ включення/відключення ГА, а також виконанням програм пуску $PRST$ або зупинки $PRSP$, синхронізації $PRSY$, розподілу $PRSH$ або переведення $PRUNL$ навантаження [2].

Із цієї постановки випливає, що програма координатора після кожного технологічного циклу $T_{\text{ТЦ}}$ повинна: визначити кількість ГА, підключених до ГРЩ, тобто виконати підпрограму рахування $SBCNT$, що породжує предикат $WRK(l)=I$, якщо працюють l ГА; розрахувати необхідну, відповідно до завантаження, кількість ГА, тобто виконати програму $PRNRY$, що породжує предикати $NRY(l)=I$, $NRY(l+1)=I$, $NRY(l-1)=I$, якщо в САЕЕС необхідні відповідно l , $l+1$, $l-1$ паралельно працюючих ГА й вибрати резервний ГА за допомогою програми $PRSEL$ для запуску $PRST$ або зупинки $PRSP$.

Узагальнена структура перетворювача для управління складом ГА, яка відповідає сформульованим вимогам, буде мати вигляд, представлений на рис. 4.5, де $GA(NGA) = \bigcup_{i=1}^m GA(i)$ – безліч ГА, установлених у САЕЕС.

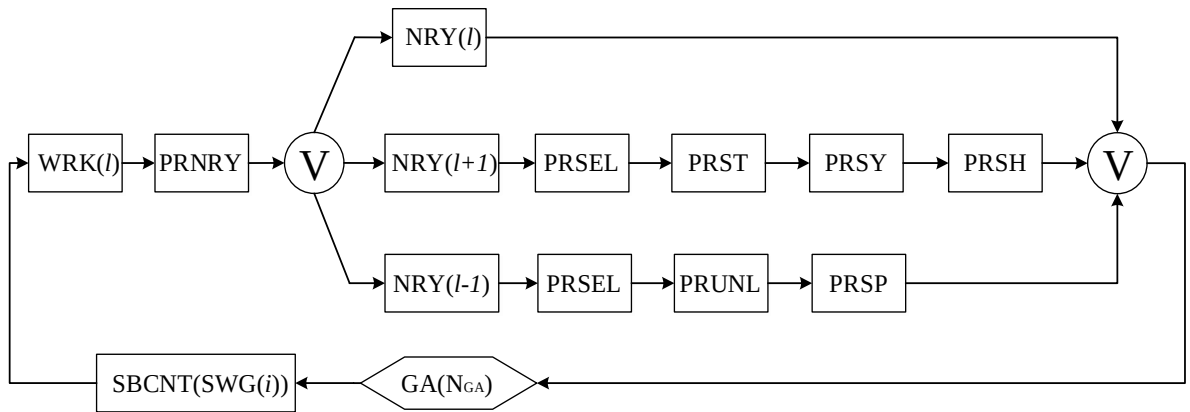


Рис. 4.5. Узагальнена структурна схема перетворювача

На наступному етапі розглянемо питання, пов'язані з логічним модулем $SBCNT$, що породжує предикат:

$$WRK(l) \in WRK(N_l), l \in N_l, N_l = \overline{0, m}, |N_l| = m+1.$$

У якості вхідної інформації приймемо сигнали $SWG(i) \in SWG(N_{GA})$, що надходять у контролер від сигналізаторів станів (вмик/вимк) генераторних автоматичних вимикачів $SWG(N_{GA})$, $|N_{GA}| = m$, що утворюють на вході пристрою введення у кожний технологічний цикл $T_{\text{ТЦ}}$, m – розрядне двійкове слово $S_{SWG(i)} \in S_{SWG(N_S)}$ з кількістю можливих різних комбінацій значень змінних, обумовлених вираженням $2^m = |N_S|$.

Оскільки $|N_l| \neq |N_s|$, те між $WRK(N_l)$ і $S_{SWG}(N_s)$ можна встановити функціональну відповідність у вигляді булевих функцій:

$$WRK(l) = \bigvee_{j=1}^{C_m^l} k_j^l$$

де k_j^l – кон'юнкція, конституєнта одиниці, у якій l неінверсних і $m-l$ інверсних змінних $S_{SWG}(i)$; $\bigvee$ – диз'юнкція, що поєднує всі можливі кон'юнкції повної довжини. Таку відповідність можна задати, також, табличним способом, наприклад (див. табл. 4.6) для 4-х агрегатної ($m = 4$) СЕЕС.

Таблиця 4.6 - Комбінації ГА 4-х агрегатної СЕЕС

	$S_{SWG}(N_S)$															
	0	1	2	4	8	3	5	6	9	10	12	7	11	13	14	15
$SWG(1)$	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1
$SWG(2)$	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1
$SWG(3)$	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1
$SWG(4)$	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
$WRK(l)$	$WRK(0)$	$WRK(1)$				$WRK(2)$						$WRK(3)$			$WRK(4)$	

У цьому випадку можна запропонувати кілька способів формування алгоритмів функціонування модуля $SBCNT$. Наприклад, якщо виконати арифметичне додавання значень вхідних змінних і результат обрати як дійсний предикат, то одержимо наступне правило:

$$while \ SBCNT \ do : \sum_{i=1}^m SWG(i), \text{ if } \sum_{i=1}^m SWG(i) = l \text{ then } WRK(l) \text{ fi od} .$$

Можна, також, використовувати вхідне слово $\bigcup_{i=1}^m SWG(i)$, як адресу дійсного предикату. Тоді не крайнім предикатам будуть відповідати однозначні групи адресних слів. Наприклад, предикат $WRK(1)$ породжується правилом:

$$\text{if } \bigvee (S_{SWG}(1), S_{SWG}(2), S_{SWG}(4), S_{SWG}(8)) \text{ then } WRK(1) \text{ fi} .$$

Наступний етап дослідження пов'язаний з модулем $PRNRY$, що породжує предикати $NRV(l)$, $NRV(l+1)$, $NRV(l-1)$ поодинокі, або паралельно, працюючих ГА (залежно від визначеного завантаження). Тут виникає необхідність у породженні первинних предикатів $PH(N_l)$ і $PD(N_l)$, що ідентифікують досягнення навантаженням верхніх і нижніх порогів завантаження ГА.

Верхні пороги завантаження визначаємо з розрахунку припустимого за технічними умовами навантаження P_d на один ГА й необхідного запасу генерованої потужності $v_1 P_d$, $0 < v_1 < 1$, а нижні пороги із розрахунку доцільного з економічних міркувань запасу потужності $v_2 P_d$, $0 < v_2 < 1$. У такому випадку породження предикатів $PH(l)$, $PD(l)$ записуємо у вигляді правила:

$$\begin{aligned} & \text{while } PRNRY \text{ do: } \sum_{i=1}^l P_{\Gamma}(i) \text{ if } \sum_{i=1}^l P_{\Gamma}(i) \geq (\sum_{i=1}^l P_d(i) - v_1 P_d) \\ & \text{then } PH(l) \text{ else if } \sum_{i=1}^l P_{\Gamma}(i) \leq (\sum_{i=1}^l P_d(i) - v_2 P_d) \text{ then } PD(l) \text{ else fi od,} \end{aligned} \quad (4.4)$$

де $P_{\Gamma}(i)$ – поточне навантаження i -го ГА. Потужність $P_{\Gamma}(i)$, залежно від технічних умов, буде змінюватися у межах:

$$(1 - \frac{1+v_2}{l})P_d \leq P_{\Gamma}(i) \leq (1 - \frac{v_1}{l})P_d, P_d = P_H K_{RCL}, \quad (4.5)$$

де K_{RCL} – коефіцієнт перерахування потужності при зміні умов навколишнього середовища; $(1 - \frac{1+v_2}{l})$ – коефіцієнт завантаження; P_H – номінальна потужність ГА. З виразу (4.5) видно, що зі збільшенням числа l паралельно працюючих ГА коефіцієнт завантаження зростає. На рис. 4.6 показана діаграма управління складом ГА за принципом "жорстких" порогів завантаження при $v_1=0,2$ і $v_2=0,4$, відповідно до управління 4-х агрегатною САЕЕС.

З аналізу (4.4) і (4.5) випливає, що змінювати пороги завантаження САЕЕС можна варіюючи параметрами v_1 , v_2 , P_d (окремо або у різних комбінаціях), тобто можна реалізовувати безліч способів управління СААЕС за принципом "гнучких" порогів завантаження агрегатів. Проте, ці способи не будуть вичерпними, тому що вони передбачають управління лише генерованою потужністю. Якщо ж урахувати можливість управління навантаженням СЕЕС (шляхом відключення/включення частини споживачів та заборонаю на включення споживачів на певному піку завантаження), а також передбачити використання накопичувачів електроенергії, то область способів управління складом ГА можна значно розширити. У цьому випадку потрібна постановка завдання про часові затримки пуску резервного ГА.

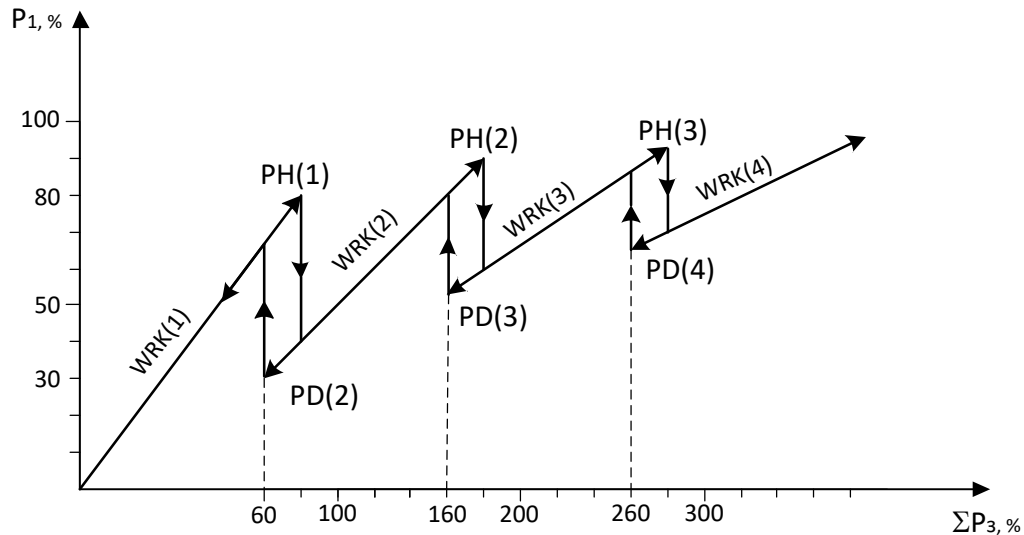


Рис. 4.6. Діаграма управління управління складом ГА за принципом "жорстких" порогів завантаження

З метою фільтрації нетривалих викидів навантаження, пов'язаних, наприклад, з пуском або повторно-короткочасною роботою споживачів, доцільно використовувати спосіб часового розподілу викидів, а для узгодження перевантажувальних характеристик ГА - з часовими затримками (спосіб амплітудно-часового поділу). У цьому випадку викиди не повинні враховуватися, якщо їх тривалість менше заданого часового інтервалу $t_{PH}(min) \pm \Delta t_{PH}$, де Δt_{PH} – часовий інтервал, що корегує нестабільність тривалості викиду.

Якщо ж після закінчення $t_{PH}(min)$ значення викиду $PH(l)=I$, то значення другого часового інтервалу затримки обирається залежно від величини потужності ΔP_H що встановилась, відповідно до навантажувальних характеристик ГА, наприклад, як

$$t_{PH} = \begin{cases} t_{PH}(min), & \text{if } \Delta P_{PH} \geq \Delta P_{PH}(max) \\ k_1(\exp(-\Delta P_H)), & \text{if } \Delta P_{PH}(min) < \Delta P_{PH} < \Delta P_{PH}(max), \\ t_{PH}(max), & \text{if } 0 \leq \Delta P_{PH} < \Delta P_{PH}(min) \end{cases}$$

або так, як показано на рис. 4.7. Для відліку затримок $t_{PH}(min)$ і $t_{PH}(j)$ повинні бути передбачені підпрограми таймеру $PR1TM$ і $PRTM$, що породжують відповідні їм предикати $T1PH$ і TPH за правилом:

```

if  $P_H(l)$  then PR1TM else fi
while PR1TM do procedure:  $B_{PH}^{min}, B_{PH}^{min} - r_{CNT}$  od;
if  $B_{PH}^{min} - r_{CNT} = 0$  then T1PH else PR1TM fi;
if  $P_H(l) \& T1PH$  then PRTM else fi;
while PRTM do procedure:  $B_{PH}, B_{PH} - r_{CNT}$  od;
if  $B_{PH} - r_{CNT} = 0$  then TPH fi,

```

де $B_{PH}^{min} = t_{PH}^{(min)} / \Delta t_{PH}$ й $B_{PH} = t_{PH} / \Delta t_{PH}$ – числа, що відображають величини

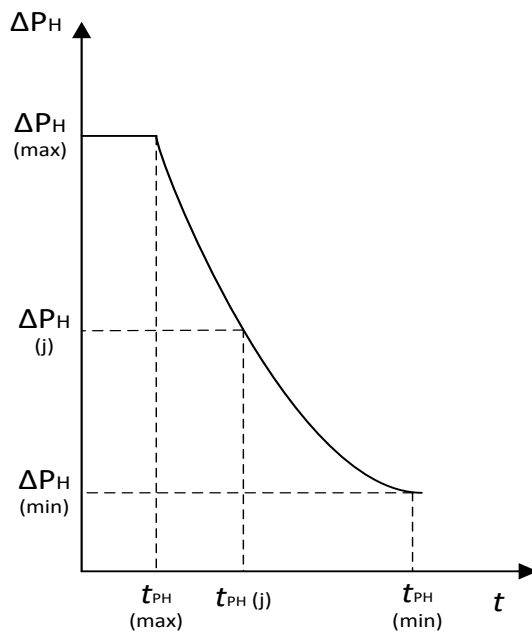


Рис. 4.7. Діаграма корегування часової затримки від потужності

часових інтервалів при заданому одиничному інтервалі Δt_{PH} ; r_{CNT} – число, відповідне до порядкового номеру поточного одиничного інтервалу, тобто поточному значенню часу t на відріжку t_{PH} , $t = r_{CNT} \Delta t_{PH}$.

Підкреслимо, що даний підхід до визначення часової затримки справедливий для викиду що встановився, коли протягом часу t_{PH} імовірність подальшого збільшення навантаження мала. У той же час, як показує практика [277, 278], (див. рис. 2.10), на окремих

рівнях завантаження СЕЕС мають місце істотні коливання стандартного відхилення σ_x відносно його середніх значень. Неврахування цих коливань може за час затримки привести до перевантаження двигуна, що є істотним недоліком. Усунути цей недолік можна шляхом порівняння значень дійсної, виробленої до теперішнього моменту часу r_{CNT} , енергії W_T з припустимою енергією W_D на ділянці $t_{PH} = B_{PH} \Delta t_{PH}$, отриманою за результатами виміру потужності у нульовому такті $\Delta P_H(0)$ (див. рис. 4.8). Тобто можна вважати, що час затримки мине у той момент, коли:

$$W_T - W_D \geq 0; W_T = \sum_{j=1}^{r_{CNT}} \Delta P_{PH}(j), W_D = \Delta P_{PH}(0) B_{PH}.$$

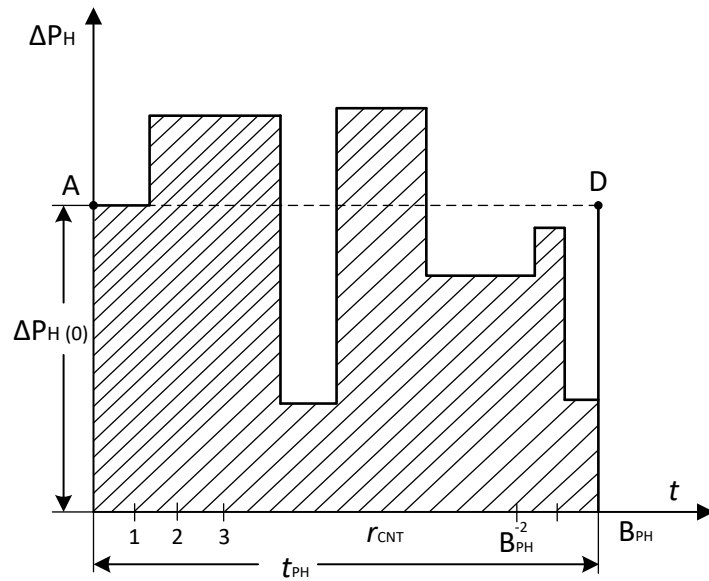


Рис. 4.8. Навантаження СЕЕС: а) припустиме (лінія А–D);
б) дійсне (заштрихована область)

У такому випадку процедура контролю часу затримки зводиться до наступного правила:

```

if  $P_H(l)$  then  $PRTM$  else fi;
while  $PRTM$  do procedure  $CTM : \Delta P_{PH}(0), t_{PH}, \Delta t_{PH}, B_{PH}$ 
while  $CTM$  do:  $\sum_{j=1}^{r_{CNT}} \Delta P_{PH}(j) - \Delta P_{PH} B_{PH}$  if
 $\sum_{j=1}^{r_{CNT}} \Delta P_{PH}(j) - \Delta P_{PH} B_{PH} > 0$  then  $TPH$  else  $PRTM$  fi.

```

Процедура CTM на підставі $\Delta P_{PH}(0)$ визначає t_{PH} , розраховує B_{PH} і веде лік програми таймеру. Після закінчення часу t_{PH} , якщо $\Delta P_{PH} > 0$, можна (з метою збереження поточного складу ГА за критерієм техніко-економічної доцільності) передбачити заходи для їхнього розвантаження, наприклад, шляхом відключення другорядних споживачів (CNS) або включення накопичувача електроенергії. Природно, що перерва у живленні другорядних споживачів, також як і час віддачі електроенергії накопичувачами, обмежені. І, якщо після закінчення цього часу дефіцит генерованої потужності буде незмінним, то використання цих прийомів неможливе. Тому виникає необхідність у оцінці прогнозу навантаження СЕЕС після t_{PH} .

Найбільш повно зміни споживаної потужності у САЕЕС описуються випадковою функцією часу $p=x(t)$. Вона задається: математичним очікуванням $M_x(t)$, дисперсією $\sigma_x^2(t)$ і кореляційною функцією $K_x(\tau_r)$.

Як видно з отриманих на підставі обробки експериментальних даних графіків (рис. 3.2 - 3.5), випадковий процес зміни навантаження у ходовому й стояночному режимах характеризується кореляційним зв'язком, що різко зменшується зі зростанням інтервалу τ_r . Тому, вже у області $\tau_r > 1$, випадковий процес можна вважати ергодичним, а зміну навантаження характеризувати випадковою величиною $\bar{x}$. Тому прогноз енергії $\bar{S}$, необхідної для забезпечення додаткового, вищого ніж x_{PH} , навантаження на часових ділянках після t_{PH} необхідно розраховувати по формулах, наведених раніше. Для виконання процедури розрахунків $C\bar{S}$ і оцінки прогнозованої енергії $\bar{S} < S_{ACC}$ шляхом порівняння її з можливою доступною енергією накопичувача S_{ACC} , а також породження предикату $SWACC$, що алгоритмизує включення накопичувачів, передбачимо спеціальну програму:

```

if PH & TPH then PRACC else fi;
while PRACC do procedure  $C\bar{S} : M_x, x_{PH},$ 
 $\sigma_x, k_x(\tau_r), \sigma_x, \Phi(z_r), \bar{S},$ 
if  $\bar{S} < S_{ACC}$  then SWACC else NOTACC fi

```

де $NOTACC$ – предикат, що свідчить про те, що накопичувач енергії не здатний розв'язати проблему розвантаження СЕЕС.

Структура програми $PRCNS$, що формує предикат $OFCNS$ на відключення другорядних споживачів, аналогічна програмі $PRACC$.

В умовах невизначеності зміни навантаження, а також у режимах маневрування судна виникає необхідність у забороні на зміну убік зменшення (від цілком певного числа) паралельно працюючих ГА навіть, якщо при оцінці навантаження породжується предикат $PD(l)$. Досягається це шляхом завдання мінімально припустимої (l_{min}) кількості ГА. Зв'яжемо взаємно-однозначною відповідністю безліч цих завдань із безліччю предикатів $MIN(l)$, причому таких, що, якщо $MIN(l)=I$, то мінімально припустимим числом ГА

буде $l_{\min}$. Таким чином визначені правила формування групи базових предикатів $WRK(l)$, $PH(l)$, $PD(l)$, TPH , TPD , $MIN(l)$, $NOTACC$, $NOTCNS$. Це дозволяє записати результатні функції RFU_{NRY} , що породжують ці предикати:

$$\begin{aligned} RFU_{NRY}(l) &\cong (WRK(l) \& \overline{PH}(l) \& \overline{PD}(l) \& \overline{MIN}(l_{\min} > l)) \rightarrow NRY(l); \\ RFU_{NRY}(l+1) &\cong (WRK(l) \& PH(l) \& TPH \& \overline{ACC} \& \overline{CNS} \vee MIN(l_{\min} > l)) \rightarrow \\ &\rightarrow NRY(l+1); RFU_{NRY}(l-1) \cong (WRK(l) \& PD(l) \& TPD \& OFACC \& ONCNS \vee \\ &\vee \overline{MIN}(l_{\min} \geq l)) \rightarrow NRY(l-1). \end{aligned}$$

Наступним завданням, що виникає при дослідженні правил функціонування перетворювача $WRK(l) \rightarrow NRY(l \pm 1) \rightarrow WRK(l \pm 1)$, є визначення способу завдання черговості включення/відключення ГА.

Вважаємо, що у системі є задатчик, за допомогою якого можна задати будь-яку послідовність (черговість) $SQ(f) \in SQ(N_{SQ})$, узятую з упорядкованої, пронумерованої безлічі $SQ(N_{SQ})$ усіх можливих послідовностей. Тоді, якщо у CAEEC установлені m генераторів $|GA| = m$, то безліч черговостей складе $|SQ(N_{SQ}) = m!|$, тобто зі зростанням m , черговість зростає за факторіалом. У сучасних CAEEC не прагнуть до одержання всієї розмірності $m!$, оскільки це є надлишковим ускладненням синтезу. У зв'язку із цим, при відборі елементів підмножини $SQ(f) \in SQ(N_{SQ})$, доцільно керуватися тим, щоб була забезпечена можливість постановки кожного ГА у будь-яку чергу. Для цього достатньо мати у розпорядженні послідовності обмеженого обсягу $|SQ(f)| = m$:

$$\left| \begin{array}{c} SQ(1) \\ SQ(2) \\ SQ(3) \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ SQ(m-1) \\ SQ(m) \end{array} \right| \cong \left| \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & \dots & \dots & \dots & m \\ 2 & 3 & 4 & \dots & \dots & m & 1 \\ 3 & 4 & 5 & \dots & m & 1 & 2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m-1 & m & 1 & 2 & \dots & \dots & m-2 \\ m & 1 & 2 & \dots & \dots & m-2 & m-1 \end{array} \right| \quad (4.6)$$

Синтез алгоритму завдання черговостей (4.6) набагато простіший синтезу повнорозмірного алгоритму, оскільки можна обійтися обранням поточної $SQ(i)$ послідовності серед m послідовностей.

Таким чином, запропонований спосіб підвищує надійність роботи САЕЕС, оскільки виключені можливі аварійні режими при завданні помилкових комбінацій управління: послідовності включення ГА при неповноті зазначеній комбінації, при незазначеній послідовності, при вказівці одного ГА кілька раз у одній послідовності й при збігу двійкових наборів різних комбінацій послідовності включення ГА в СЕЕС.

4.4. Управління СЕЕС за умови мінімуму витрати палива та з урахуванням метеорологічних умов плавання

Розглянуті у § 4.3 завдання управління СЕЕС за принципом "гнучких" порогів завантаження викликають необхідність детального пророблення завдань оптимізації, пов'язаних з мінімізацією витрати палива.

Експлуатовані на сучасних суднах САЕЕС характеризуються низьким коефіцієнтом завантаження встановленої потужності [279] і, як наслідок, низькою економічністю. Це пояснюється не тільки існуючими принципами комплектації СЕЕС, але й недосконалою організацією режимів її роботи. Дотепер, розв'язання розглянутих завдань роблять, як правило, за допомогою наближених способів, прагнучи до збільшення тільки одного критерію – надлишкового резервування енергії у основних режимах роботи судна. Звичайно, при розрахунках необхідної потужності й припустимих значень завантаження СЕЕС за режимами, виходять із усереднених, або граничних, значень некерованих змінних (запиту завантаження, температури, тиску, вологості середовища та т. і.), не враховуючи можливий діапазон їх зміни. Це приводить до зниження техніко-економічних показників СТС і К. Особливу увагу звернемо на необхідність обліку метеоумов у розрахунках верхніх рівнів завантаження дизелів - щоб уникнути їх термічних перевантажень [251-253, 259, 260]. Відомо, що граничне навантаження судових дизелів починає знижуватися при підвищенні температури навколишнього повітря більш 27 °С, вологості більш 60 % і зниженнях барометричного тиску нижче 101,3 кПа

[259]. Вплив цих факторів у сучасних системах ураховують вибірково, у той час як вони діють взаємозалежно.

Наприклад [22], де фірма-виробник "Wartsila-Sulzer" указує у паспортах дизелів, що нормальними параметрами середовища є: атмосферний тиск 720 мм рт. ст., температура повітря 20 °С, вологість 70 % і попереджає про те, що будь-яке відхилення цих величин, особливо температури усмоктувального повітря й тиску, суттєво погіршує характеристики двигуна. Найбільш характерними змінами, при плаванні судна у тропіках, є зменшення потужності, збільшення питомої витрати палива й температури випускних газів, викликані зменшенням вагового заряду повітря й підвищенням його початкової температури. Це пояснюється тим, що при зменшенні вагового заряду повітря ρ_k зменшується коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = k\eta_v\rho_k / g_{\text{ц}}$, де η_v – коефіцієнт наповнення циліндру, а $g_{\text{ц}}$ – циклова подача палива. У свою чергу зниження α викличе зменшення індикаторного ККД η_i і, як наслідок, ефективного ККД двигуна $\eta_e = f(\alpha)$. У результаті обертаючий момент дизеля $M = kg_{\text{ц}}\eta_e$ почне знижуватися, а регулятор частоти обертання, з метою стабілізації частоти генерованого струму, почне збільшувати подачу палива $g_{\text{ц}}$, що приведе до перевантаження за середнім індикаторним тиском. При цьому температура випускних газів почне зростати. Надмірне підвищення температури випускних газів змушує зменшувати циклову подачу палива, що приводить до сумарного зменшення генерованої потужності ГА.

Дослідження режимів роботи 6-ти агрегатної СЕЕС суден типу "Marco Polo" показали, що типові коливання зовнішніх умов ($t^\circ = 20 \div 45^\circ \text{C}$; $\phi = 60 \div 85\%$; $P_a = 750 \div 780 \text{ мм рт.ст.}$) приводять до зміни гранично припустимої, за термічним навантаженням, потужності - від 735 до 604 кВт (на 18 %). Часті коливання навантаження й параметрів навколишнього середовища протягом доби роблять для обслуговуючого персоналу нелегкоздійсненним розв'язання завдання оптимального визначення складу ГА. Тому, щоб уникнути ризиків термічного перевантаження, доводиться підт-

римувати надлишковий запас генерованої потужності. Наприклад, у ходовому режимі замість можливих чотирьох, працює п'ять ГА при малих і середніх навантаженнях. Це приводить до зниження механічного ККД, і, як наслідок, зменшенню ефективного $\eta_e = \eta_i \eta_m$ ККД. Аналіз умов експлуатації суднових двигунів ДГ [261] показує, що середнє завантаження СЕЕС становить 25-30 % загальної номінальної потужності генераторів. На судах окремих типів ДГ, протягом майже всього робочого часу (90 %), завантажені менш ніж на 50 %. Тривала робота двигунів зі зниженим навантаженням приводить до відкладень на продувних і вихлопних вікнах, клапанах, газотурбонагнетачах, вихлопних колекторах і трубопроводах, що знижує економічність роботи двигуна. Відомі випадки виходу з ладу мотилевих і рамових підшипників двигунів через тривалу роботу на малих навантаженнях. Так, на судах "Слов'янськ" і "Бежиця" при роботі одного ДГ із навантаженням 270 кВт замість двох ДГ, що працюють паралельно з навантаженням менш 50 % $N_{e_{ном}}$, добова економія дизельного палива сягає 0,8 т, циркуляційного мастила 10 л при збереженні ресурсу ДГ. Таким чином, усунення цих недоліків дозволяє, у цілому, на флоті одержати істотний техніко-економічний ефект. Розв'язання цієї проблеми зв'язане, по-перше, з розробкою алгоритмів оцінки й безперервного контролю припустимих навантажень дизелів, і, по-друге, із розробкою таких САУ двигунами, які ураховують зміни параметрів навколишнього середовища.

Міжнародним конгресом двигунобудівників рекомендована методика, у основу якої покладені формули К. Ціннера [251-253] при визначенні залежності зміни індикаторної потужності:

$$k = \frac{N_{iТ}}{N_{iН}} = \left(\frac{D - P_{П}}{99} \right)^m \left(\frac{293}{T} \right)^n \left(\frac{293}{T_w} \right)^q,$$

де $N_{iз}$, $N_{iо}$ – індикаторна потужність у поточних і нормальних умовах, відповідно; D – барометричний тиск, кПа; $P_{П}$ – парціальний тиск водяної пари, кПа; T , T_w – температура повітря на усмоктуванні та охолоджуючої води, відповідно, К.

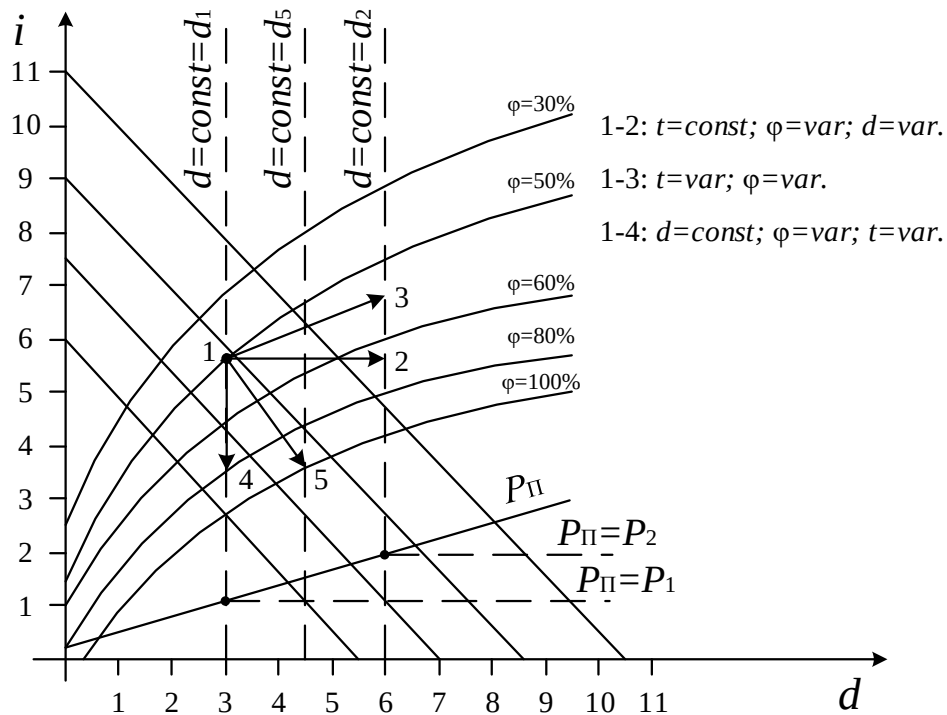


Рис. 4.9. Вплив змінювання відносної вологості на парціальний тиск P_{Π}

Парціальний тиск визначається i - d діаграмою вологого повітря (див. рис 4.9) у функції температури й вологості середовища; показники ступеня m , n , q визначаються залежно від нормальних значень сумарного коефіцієнту α_c надлишку повітря [260, 262, 263]:

$$m = \begin{cases} 0,1, & \text{якщо } 1,7 < \alpha < 2,1; \\ 0,3, & \text{якщо } \alpha < 1,7 \end{cases}; \quad n = \begin{cases} 0,2\eta_M, & \text{якщо } \alpha > 2,1 \\ 0,35\eta_M, & \text{якщо } 1,7 < \alpha < 2,1; \\ 0,55\eta_M, & \text{якщо } \alpha < 1,7 \end{cases}; \quad q = \begin{cases} 0,2\eta_M, & \text{якщо } \alpha > 2,1 \\ 0,3\eta_M, & \text{якщо } 1,7 < \alpha < 2,1. \\ 0,6\eta_M, & \text{якщо } \alpha < 1,7 \end{cases}$$

З обліком механічного ККД η_M , коефіцієнт перерахування k_{RCL} потужності визначається формулою $k_{RCL} = (k - 0,7(1 - k))/\eta_M - 1$, а припустима P_{di} потужність i -го ДГ виразом $P_{di} = k_{RCL} \cdot P_H$. Очевидно, що при зміні температури повітря від 27 до 62 °С, значення k_{RCL} змінюється від 0,96 до 0,88, а при змінах трьох параметрів (T , D , ϕ) – від 0,93 до 0,85. При аналізі прийнято, що температура охолоджуючої води змінюється у межах 25 ÷ 35°С. Таким чином, встановлюємо закон визначення k_{RCL} , використання якого у алгоритмах (4.4) надає гнучкість у породженні предикатів $PH(I)$, $PD(I)$, що у свою чергу, дозволяє експлуатувати ГА у зонах максимально близьких до загороджуваль-

них характеристик при гарантуванні надійності і безпеки, і тим самим підвищити коефіцієнт завантаження СЕЕС [264, 265].

Представимо ще один зі способів подальшого вдосконалювання управління САЕЕС шляхом підтримки оптимального режиму роботи головного двигуна, якщо у якості критерію оцінки режиму прийняти сталість значення сумарного коефіцієнту надлишку повітря $\alpha_c - \alpha_{opt} \Rightarrow \min$, де α_c – поточне, α_{opt} – оптимальне для цього режиму роботи дизеля, значення коефіцієнту, при якому досягається максимально можлива потужність при мінімальній витраті палива й припустимій температурі випускних газів. У суднових умовах сумарний коефіцієнт надлишку повітря можна визначити [22, 23, 30, 34] за показниками приладів вимірювання, користуючись вираженням:

$$\alpha_c = A_1 \frac{P_S}{T_S G_T} \left(\frac{1}{1 + 1,61d(i)} \right),$$

де A_1 – коефіцієнт, що враховує конструктивні особливості дизеля при постійному добутку коефіцієнтів наповнення й продувки; P_S і T_S – тиск і температура повітря у турбонагнітачі; G_T – витрата палива у одиницю часу; $d(i)$ – вологовміст повітря у i -му статичному режимі.

Цей взаємозв'язок можна представити у вигляді номограм, рис. 4.10, де витрата вологого й сухого повітря зв'язані відношенням

$$\frac{G_{BC}}{G_{BV}} = \frac{1}{1 + 1,61d_i}.$$

Значення d_i знаходять за допомогою таблиць вологого повітря або i – d діаграми. З номограм (рис. 4.9 і рис. 4.10) випливає, що якщо при навантаженні ДГ $P(i)$ і витраті палива G_T^A , інші робочі параметри будуть характеризуватися набором $\{P_S(i), T_S(i), d_i\}$, то сумарний коефіцієнт надлишку повітря буде $\alpha_c(i) < \alpha_{opt}$ меншим оптимального значення, а витрата сухого повітря на ΔG_{BC} меншої норми, що погіршить процес згоряння й приведе до росту температури випускних газів.

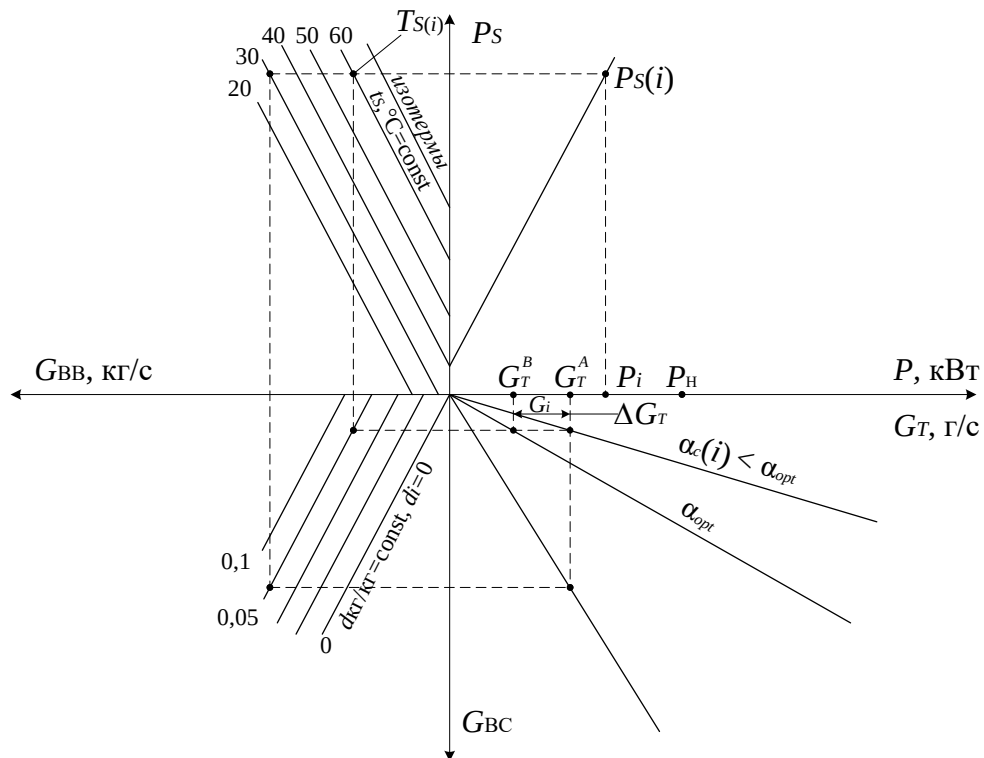


Рис. 4.10. Залежності витрати вологого і сухого повітря від потужності

У цьому випадку регулювати режим роботи дизеля можна способами: зменшенням витрати палива на величину ΔG_T шляхом перерозподілу навантажень між паралельно працюючими ГА $PRSH$, або підключенням накопичувачів $ONACC$, або відключенням другорядних $OFCNS$ для даного режиму споживача, а також зниженням температури наддувочного повітря T_S за рахунок збільшення потоку охолоджуючої води у системі охолодження наддувочного повітря. Слід зазначити, що зона $\alpha_c > \alpha_{opt}$ є також небажаною, оскільки збільшення α_c приводить до погіршення процесу згоряння, збільшенню втрат тепла, що йдуть із газами й зменшенням індикаторного ККД.

Виконані дослідження дозволяють синтезувати алгоритм оптимізації $PROPT$ режимів роботи дизелів, якщо у якості умови прийняти, що система містить усі необхідні датчики $\{P_S, P_i, T_S, G_T, \varphi, t^r\}$ де φ – вологість повітря, t^r – температура вихлопних газів, $\{SMW, SMF\}$ виконавчі органи (сервоприво-

ди) за допомогою яких можна управляти подачею води SMW для охолодження наддувочного повітря й подачею палива SMF .

У якості способу організації роботи програми $PROPT$ виберемо спосіб переривання з періодом дискретності $T_{ЦО}$ обумовленим динамічними властивостями системи охолодження наддувочного повітря й дизеля, як двигуна внутрішнього згоряння. Для полегшення процедури логічного програмування, представимо програму $PROPT$ у вигляді сукупності $PROPT = \{SBHTP, SBALF, SBSM, SBCNT\}$ підпрограм, а саме підпрограми SB контролю високої температури $SBHTP$, розрахунків відхилень коефіцієнта надлишку повітря $SBALF$, управління сервомоторами $SBSM$ і розрахунків тривалості включення сервомотора CNT .

З обліком викладеного запишемо правила функціонування системи у вигляді наступних інструкцій:

```
while  $T_{ЦО}$  do  $PROPT, SBALF, SBHTP, SBSM, SBCNT$  od
while  $SBALF$  do: ( $t_i^r - t_{доп}^r = \Delta t^r$ ) if  $\Delta t^r > 0$  then  $HTP$ 
go to  $SBHTP$  else do: ( $\alpha_c(i) = f(P_s, P_i, T_s, G, \varphi,$ 
 $\Delta \alpha_c(i) - \alpha_{opt})$  if  $|\Delta \alpha_c(i)| > \Delta \alpha_{доп}$ 
then go to  $SBSM$  else fi od,
```

тобто виконання підпрограми $SBALF$ завжди починається з контролю температури випускних газів t^r і, якщо вона вище норми ($HTP = I$), то здійснюється перехід до $SBHTP$, інакше проводяться розрахунки $\alpha_c(i)$ й порівняння його з оптимальним значенням α_{opt} , якщо при цьому відхилення вище припустимого, то перехід до $SBSM$, інакше - кінець програми.

Підпрограма $SBHTP$ виконується за правилом:

```
while  $SBHTP$  do if  $HTP \& \overline{WVOPN}$  then
 $ONSMW(INC)$  do  $B_w = f(\Delta t^r)$  go to  $SBCNT$  else
if  $HTP \& WVOPN \& DCF$  then  $ONSMF(DEC)$  do
 $B_F = f(\Delta t^r)$  go to  $SBCNT(BF)$  else fi od,
```

тобто якщо температура випускних газів вище норми ($HTP = I$) і клапан системи охолодження наддувочного повітря повністю не відкритий $\overline{WVOPN}$, то:

включається *ON* сервомотор *SM* у напрямку збільшення *INC* подачі охолоджуючої води *ONSMW(INC)*; розраховується час його роботи B_w залежно від перевищення температури й здійснюється перехід до підпрограми відліку *SBCNT* часу роботи сервомотора. Якщо ж при підвищеній температурі газів клапан води виявиться повністю відкритим *WVOPN* і на верхньому рівні (рівні координатора) ухвалене рішення *DCF* знизити температуру газів зменшенням подачі палива, то включається *ON* серводвигун *SMF* регулятора у напрямку зменшення подачі палива *ONSMF(DEC)*, розраховується час його роботи B_F і здійснюється перехід до підпрограми відліку часового інтервалу *SCBNT*(B_F), інакше - кінець підпрограми.

Інші $\{SBSM, SBCNT\}$ підпрограми повинні виконуватися по наступних інструкціях:

*while SBSM do if $(\Delta\alpha_c(i) < 0) \& \overline{WVOPN}$ then *ONSMW(INC)*
do $B_w = f(\Delta\alpha)$ go to *SBCNT*(B_w) else if $(\Delta\alpha_c(i) > 0) \& \overline{WVCLS} \& \overline{HTP}$
then *ONSMW(DEC)* do $B_w = f(\Delta\alpha)$ go to *SBCNT*(B_w) else if $(\Delta\alpha_c(i) < 0) \& WVOPN \& DCF$ then *ONSMF(DEC)* do $B_F = f(\Delta\alpha)$ go to *SBHTP* else fi od
while *SBCNT*(B_w) do: if $(\Delta B_w(t+1) - 1(CNT) = 0)$ then *OFSMW* else if od;
while *SBCNT*(B_F) do: if $(\Delta B_F(t+1) - 1(CNT) = 0)$ then *OFSMF* else if od,*

тобто при відхиленнях сумарного коефіцієнту надлишку повітря від оптимального включаються у відповідному напрямку сервомотори, якщо є можливість регулювання, а якщо ні, то, коли клапан уже повністю відкритий, регулювання здійснюється впливом на подачу палива, якщо є на цей дозвіл координатора ($DCP=1$). При перевищенні температури випускних газів процес відправляється до підпрограми *SBHTP*.

Виконання підпрограм *SBCNT* здійснюється шляхом порівняння результату вирахування із залишку числа, що відображає величину часового інтервалу $\Delta B(t+1)$, одиниці $1(CNT)$ рахунку, яка, як правило, еквівалентна тривалості основного такту $T_{\text{тц}}$.

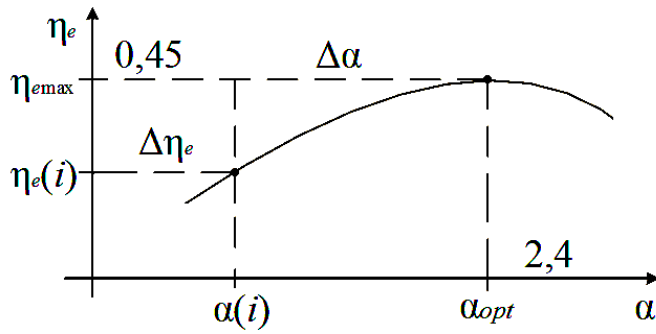


Рис. 4.11. Залежність ККД дизеля від коефіцієнту надлишку повітря при 65 % навантаженні

Підтримка оптимального режиму роботи кожного ДГ шляхом регулювання α_c сприяє розв'язанню завдання мінімізації витрати палива, тому, що для поточного значення навантаження система забезпечує не тільки нормальний тепловий режим дизеля,

але й максимальне значення його ККД, рис. 4.11.

Однак, у цілому для СЕЕС, цільова функція сумарної витрати палива може не мати глобального мінімуму:

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^l F(i) \rightarrow \min, F(i) = g_e(i)P_d(i), F_{\Sigma} = g_{e\Sigma}P_{d\Sigma}; g_{e\Sigma} = \sum_{i=1}^l \lambda(i)g_e(i);$$

де F_{Σ} , $F(i)$ – витрати палива за годину роботи СЕЕС й i -го ГА; $g_{e\Sigma}$, $g_e(i)$ – питомі витрати палива СЕЕС й i -го ГА; P_{Σ} і $P_d(i)$ – навантаження СЕЕС й i -го ГА; $\lambda(i) = P_d(i)/P_{\Sigma}$ – частка навантаження i -го ГА, а необхідною умовою існування мінімуму F_{Σ} є рівність нулю повного диференціалу $dg_{e\Sigma}$:

$$dg_{e\Sigma} = \sum_{i=1}^l \frac{\partial g_{e\Sigma}}{\partial P_d(i)} dP_d(i) = 0.$$

Для знаходження екстремуму функції $g_{e\Sigma}$ необхідно так розподілити навантаження, щоб величини $\theta(i)$ кожного ГА в точках визначеного режиму мали рівні значення, тобто $\theta(1) = \theta(2) = \dots = \theta(i) = \dots = \theta(l)$, де

$$\theta(i) = \frac{\partial(P_d(i)g_e(i))}{\partial P_d(i)} = g_e(i) + P_d(i) \frac{\partial g_e(i)}{\partial P_d(i)}.$$

Достатньою умовою оптимального розподілу навантаження, є вимога мінімуму $g_{e\Sigma} \rightarrow \min$, що виконується при $d^2 g_{e\Sigma} > 0$.

Якщо ГА мають однакові навантажувальні характеристики, то для виконання необхідної умови потрібно в точках режимів роботи СЕЕС розподі-

лити навантаження рівномірно. Для виконання умови достатності потрібне виконання умов:

$$\left\{ 2 \frac{\partial \theta}{\partial P_D(i)} > 0; 3 \left(\frac{\partial \theta}{\partial P_D(i)} \right)^2 > 0; \dots; l \left(\frac{\partial \theta}{\partial P_D(i)} \right)^{l-1} > 0 \right\},$$

що можливо тоді, коли всі похідні $\frac{\partial \theta}{\partial P_D(i)}$ позитивні.

Цей висновок у край важливий, оскільки дає можливість розрахувати, за умовами оптимальності, нижні пороги завантаження СЕЕС (див. рис. 4.12). У цьому випадку, якщо зрівняти рис. 4.6 і рис. 4.13, область роботи генераторів, обмежена припустимими межами, може зрости, а вираження (4.5) спроститися й буде мати вигляд: $P_{PD} \leq P_{\Gamma}(i) \leq (1 - \frac{v_1}{l}) P_D$.

Однак, у процесі експлуатації, навантажувальні характеристики двигунів змінюються, що може привести до істотного їхнього розкиду й постановці завдання оптимізації режимів роботи СЕЕС з урахуванням реальних навантажувальних характеристик.

Для розв'язання завдання у такій постановці доцільно використовувати метод динамічного програмування, що забезпечує вибір найбільш імовірного (квазіоптимального), для певної ділянки режиму роботи, складу ГА з дотриманням усіх обмежень. Для виконання алгоритму динамічного програмування повинні бути побудовані еквівалентні характеристики $F_{\Sigma}^{\Theta}(P_{\Sigma})$, які являють собою залежності мінімальної витрати палива агрегатів від їхньої сумарної потужності, тобто:

$$F_{\Sigma}^{\Theta}(P_{\Sigma}) = \min \{ F_i(P(i)) + F_{\Sigma-i}(P_{\Sigma} - P_i) \}.$$

Таким чином, для кожного додаткового $P(i)$ знаходження $\min F_{\Sigma}^{\Theta}(P_{\Sigma})$ зводиться до знаходження глобального мінімуму функції $F_i(P(i)) + F_{\Sigma-i}(P_{\Sigma} - P_i)$ і може бути визначено простим перебором. Одночасно з вибором складу ГА вирішується оптимізація розподілу навантажень.

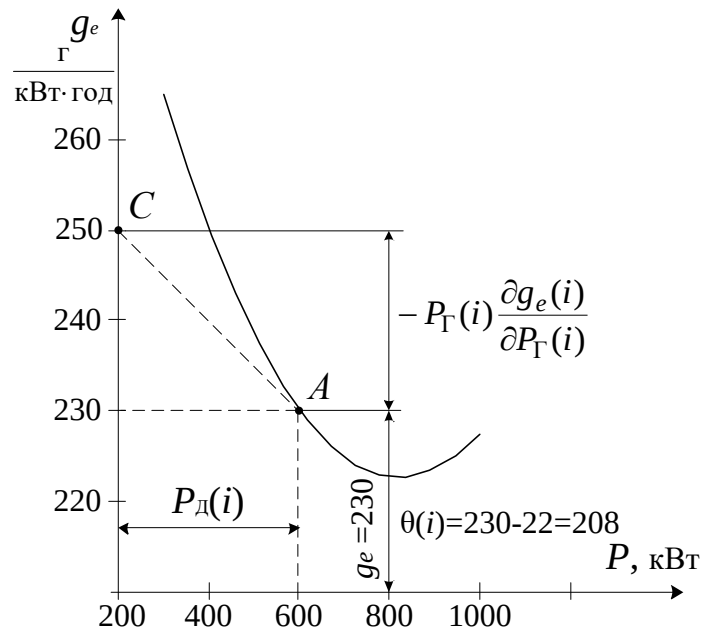
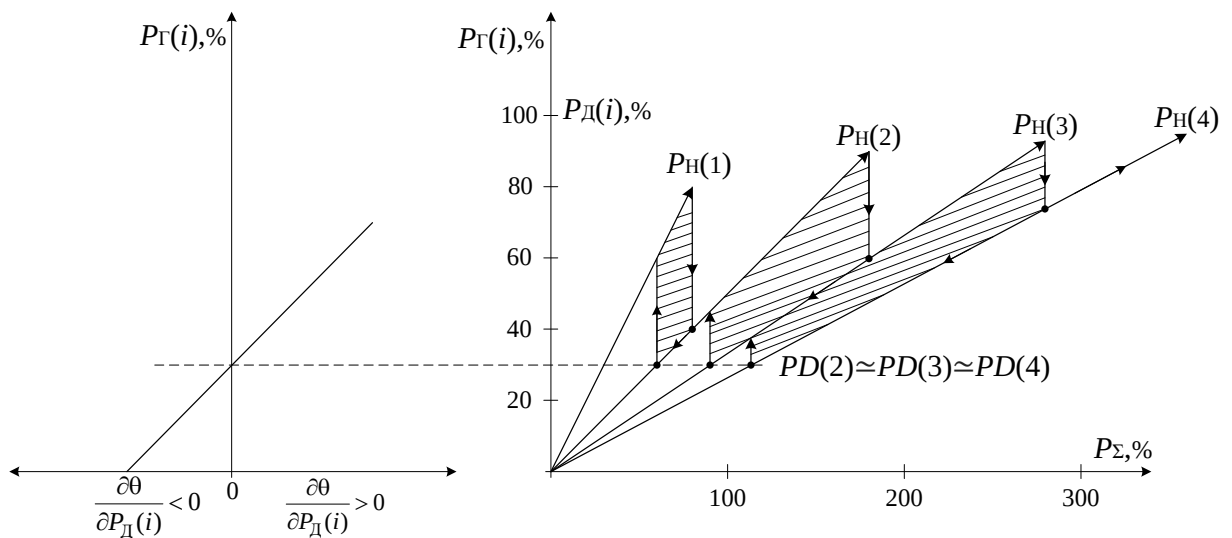
Рис. 4.12. Визначення параметру g_e 

Рис. 4.13. Визначення припустимої нижньої межі завантаження СЕЕС із умови оптимального розподілу навантаження

Виконані дослідження дозволили встановити наступні правила функціонування алгоритму оптимального управління СЕЕС при зміні навантаження, технічного стану ГА й умов навколишнього середовища.

1. Формування бази даних, що визначає кількість працюючих ГА, їх технічний стан, навантаження, витрату палива й параметри навколишнього середовища.

2. Аналіз навантажувальних характеристик агрегатів і формування бази даних для розрахунків з оптимізації режиму.

3. Визначення коефіцієнту перерахування потужності k_{RCL} й корегування верхніх порогів завантаження з умов технічного стану й метеорологічних умов.

4. Корегування припустимих, за умовами оптимального розподілу навантажень, нижніх порогів завантаження.

5. Визначення сумарного навантаження СЕЕС, аналіз еквівалентних характеристик витрати палива й вибір оптимального, за критерієм мінімуму витрати палива, складу ГА з урахуванням обмежень за верхніми і нижніми порогоми завантаження.

6. Виконання операцій пуску, синхронізації, переведення навантаження й зупинки ГА, пов'язаних з формуванням оптимального складу ГА.

7. Розподіл навантажень між паралельно працюючими ГА за умовами оптимальності $F_{\Sigma} \min(P_{\Sigma})$.

8. Виконання програми *PROPT* оптимізації первинного двигуна електростанції, що реалізає критерій $(\alpha_c - \alpha_{opt}) \rightarrow \min$.

У процесі роботи суднової СЕЕС у статичному режимі, або у період зміни складу за умовами оптимізації навантаження, можуть виникати аварійні й передаварійні ситуації, викликані вибігом контрольованих параметрів за граничний рівень. Для цих випадків дослідженням передбачені алгоритми формування команд на введення резервного і вивід аварійного ГА з урахуванням заданої черговості.

Особливості синтезу алгоритмів даного типу розглядаються у наступному параграфі.

4.5. Управління СЕЕС у нормальних і аварійних режимах роботи

Розв'язання завдання є продовженням дослідження властивостей перетворювача, отриманого у §4.3, зокрема, його підпрограми *PRSEL*.

Структуру програми *PRSEL* зв'яжемо із двома результатними функціями U_{ST} і U_{SP} , найслабшими постумовами яких будуть предикати $ST(i)$ і $SP(i)$. Передумовами цих функцій виберемо результат роботи програм *PRCNT* і *PRNRY*, а також деяку множину предикатів з бази даних, що характеризує технічний стан ГА. Тому установимо предикативність наступних множин.

$EM(N_{GA}) = \bigcup_{i=1}^m EM(i)$, $i \in N_{GA}$ – множина предикатів про узагальнений аварійний стан $GA(i) \in GA$, причому, якщо $EM(i) = 1$, то $GA(i)$ перебуває у аварії, $N_{GA} = \overline{1, m}$ – нумерація ГА; $CR(N_{GA}) = \bigcup_{i=1}^m CR(i)$ – множина предикатів про технічний характер аварії, що вимагає екстреної зупинки $GA(i)$, причому, якщо $CR(i) = 1$, то $GA(i)$ перебуває у критичній аварії; $NCR(N_{GA}) = \bigcup_{i=1}^m NCR(i)$ – множина предикатів про некритичні аварії ГА, причому $NCR(i) = 1$, якщо $GA(i)$ перебуває в некритичній аварії.

Установимо властивості й відносини між предикатами про аварійні стани ГА. Будемо вважати, що $EM(N_{GA}) \neq \emptyset$, якщо хоча б одна з множин $CR(N_{GA})$ або $NCR(N_{GA})$ є не пустою. Крім того, установимо для цих множин наступні, взаємно однозначні, відповідності $|EM(N_{GA})| = |CR(N_{GA})|$ й $|EM(N_{GA})| = |NCR(N_{GA})|$. Таким чином, абстрактну модель перетворювача, що формує за кожним $GA(i)$ предикат про узагальнену аварію, має вигляд:

$$\bigcup_{EM} (PR, CR(N_{GA}), NCR(N_{GA}, t)) \cong ((CR(i) \vee NCR(i)) \& TEM) \rightarrow EM(i),$$

де TEM – предикат про закінчення часової затримки сигналу узагальненої аварії.

Установимо множини критичних і некритичних контрольованих аварій за кожним ГА й у цілому по СЕЕС у такий спосіб:

$$X_{CR}(i) = \bigcup_{i=1}^c x_{CR}(i), i \in N_{CR} = \overline{1, c}, |N_{CR}| = c,$$

де $X_{CR}(i)$ – множина контрольованих і пронумерованих N_{CR} за кожним ГА аварій, відображених у вигляді сигналів на логічному рівні $\{0,1\}$ з вимірювальних перетворювачів, що надходять від датчиків i ;

$$X_{NCR}(i) = \bigcup_{i=1}^n x_{NCR}(i), i \in N_{NCR} = \overline{1, n}, |N_{NCR}| = n - \text{множина сигналів } \{0,1\},$$

що відображають некритичні аварії за кожним ГА;

$$X_{EM}(i) = X_{CR}(i) \cup X_{NCR}(i) = \bigcup_{j=1}^{n+c} x_{EM}(j), j \in N_{EM}, |N_{EM}| = n + c - \text{множи-}$$

на усіх сигналів, що відображають аварії за кожним i -м ГА;

$$\begin{aligned} V_{EM} &= \bigcup_{f=1}^{n+c} x_{EM}(f) = GA(N_{GA}) \times X(N_{EM}) = \bigcup_{i=1}^m GA(i) \times \bigcup_{j=1}^{n+c} x_{EM}(j) = \\ &= \bigcup_{i,j=1,1}^{m(n+c)} (GA(i) \times X(N_{EM})) = \bigcup_{i,j=1,1}^{m(n+c)} x(i, j) = X(N_{GA}, N_{EM}) - \text{множина усіх} \end{aligned}$$

контрольованих аварій СЕЕС, причому, як впливає з цих перетворень, потужність усіх контрольованих аварій становить $|V_{EM}| = |N_{GA} \times N_{EM}| = m(n + c)$.

Прийняте позначення елементарного аварійного сигналу $x(i, j) \in X(N_{GA}, N_{EM})$ є більш виразним у порівнянні $x_{EM}(f)$, оскільки символ $x(i, j)$ несе інформацію належності до цілком певного ГА – $GA(i) \in GA(N_{GA}), i \in N_{GA}$, а також належності до цілком певної аварії, оскільки $j \in (N_{CR} \vee N_{NCR})$. Таким чином, предикати EM, CR, NCR можна виразити у вигляді наступних відповідностей:

$$\begin{aligned} \bigcup_{EM} (PR, X(N_{GA}, N_{EM})) &\cong \left(\bigvee_{i,j=1,1}^{m(n+c)} x(i, j) = 1 \right) \rightarrow EM(N_{GA}, N_{EM}); \\ \bigcup_{CR} (PR, X(N_{GA}, N_{EM})) &\cong (x(i, j) \& (j \in N_{CR})) \rightarrow CR(i); \end{aligned}$$

$$\bigcup_{NCR} (PR, X(N_{GA}, N_{EM})) \cong (x(i, j) \& j \in N_{NCR}) \rightarrow NCR(i),$$

де $EM(N_{GA}, N_{EM})$ на відміну від $EM(i)$ є сигналом узагальненої аварії на всій СЕЕС.

Стосовно інформаційної складової моделі САЕЕС. Інформація про стан і функціонування СУ САЕЕС повинна бути представлена операторові як в узагальненому, інтегральному виді, так і у деталізованому. Вид і состав її повинні відповідати ергономічним і ергатичним вимогам. Ефективність сприйняття інформаційної моделі підвищується шляхом використання оптимальних знакових алфавітів, спеціальних сигналів (колір, мерехтіння), графічних кадрів процесу. Таким чином, система повинна бути забезпечена деяким перетворювачем $X(N_{GA}, N_{EM}) \xrightarrow{PR} SMB(N_{GA}, N_{EM})$, що здійснює семантичний аналіз $X(N_{GA}, N_{EM}) \$ SMB(N_{GA}, N_{EM})$ з метою надання змісту аварії на природньою або деякою формалізованою семантичною мовою:

$$\begin{aligned} & \bigcup_{SMB} (PR, X(N_{GA}, N_{EM}), SMB(N_{GA}, N_{EM})) \cong \\ & \cong X(N_{GA}, N_{EM}) \$ SMB(N_{GA}, N_{EM}) \rightarrow SMB(N_{GA}, N_{EM}). \end{aligned}$$

Приведемо перетворення й переклад із семантичної мови на природню для основних аварійних сигналів i -го ДГ:

- $X(i,1) \$ SMB \rightarrow LBP(i,1)$ – знижений тиск мастила у i -го ГА, NCR ;
- $X(i,2) \$ SMB \rightarrow LBP(i,2)$ – немає тиску мастила, CR ;
- $X(i,3) \$ SMB \rightarrow WTP(i,1)$ – знижений тиск охолоджуючої води, NCR ;
- $X(i,4) \$ SMB \rightarrow TP(i,2)$ – немає тиску охолоджуючої води, CR ;
- $X(i,5) \$ SMB \rightarrow IBT(i)$ – висока температура мастила, CR ;
- $X(i,6) \$ SMB \rightarrow GST(i)$ – висока температура вихлопних газів, NCR ;
- $X(i,7) \$ SMB \rightarrow OVL(i)$ – перевантаження ДГ, CR ;
- $X(i,8) \$ SMB \rightarrow VLD(i)$ – низька напруга, CR ;
- $X(i,9) \$ SMB \rightarrow VLH(i)$ – висока напруга, CR ;
- $X(i,10) \$ SMB \rightarrow PQD(i)$ – низька частота, CR ;
- $X(i,11) \$ SMB \rightarrow PQH(i)$ – висока частота, CR ;
- $X(i,12) \$ SMB \rightarrow OVS(i)$ – занадто великі оберти, CR ;
- $X(i,13) \$ SMB \rightarrow PWR(i)$ – зворотна потужність, CR .

Підвищення надійності оператора у системі контролю САЕЕС, як показують дослідження здобувача, забезпечується за рахунок резерву часу на обмірковування ситуації, що можливо при використанні екранного (дисплейно-

го) способу надання інформації у розгорнутому виді, що рятує оператора від ряду допоміжних операцій, які вимагають часу. Для дублювання дисплейного викладення у локальних підсистемах доцільним є установка резервних засобів контролю і сигналізації. Такими засобами можуть служити матриці адресної сигналізації зі світлодіодів, підключених безпосередньо на плати введення-виведення. У системі управління резервним засобом є тумблерна матриця з виходом безпосередньо на виконавчу логіку механізмів.

Завдання визначення оптимальної інформаційної моделі і способів кодування інформації, розробки окремих кадрів відносяться до класу ергатичних завдань та завдань ергономіки. Тому тут перейдемо до подальшого дослідження перетворювача, вважаючи, що для запису результатних функцій U_{ST} , U_{SP} що визначені за допомогою сімейства предикатів U_{ST} , U_{SP} зв'язки між елементами множини вхідних сигналів і внутрішніх станів наступні

$$\begin{aligned} U_{ST}(i)(PR, X_{ST}) &\cong PR(v_{ST}) \rightarrow STA(i) \\ U_{SP}(i)(PR, X_{SP}) &\cong PR(v_{SP}) \rightarrow SPA(i) \\ v_{ST} \cup v_{SP} &= (WRK(i), NRY(i), SQ(m), EM(N_{GA})). \end{aligned} \quad (4.7)$$

Модель цього перетворювача багато у чому залежить від структури й властивостей задавача черговості включення/відключення ГА. Розглянемо деякі результати досліджень щодо визначення структури й властивостей задавача черговості (стосовно 4-х агрегатної СЕЕС). У цьому випадку перетворювач буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \left| \begin{array}{c} K(1) \\ K(2) \\ K(3) \\ K(4) \end{array} \right| &\cong \left| \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 3 & 4 & 1 \\ 3 & 4 & 1 & 2 \\ 4 & 1 & 2 & 3 \end{array} \right| \xrightarrow{PR} \left| \begin{array}{c} SQ(1) \\ SQ(2) \\ SQ(3) \\ SQ(4) \end{array} \right| = SQ(\overline{1,4}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Перетворювач (4.7) з урахуванням (4.8) для $ST(1)$ і $SP(1)$ описуємо як:

$$\begin{aligned} U_{ST}(1) &\cong (\overline{SWG}(1) \& \overline{EM}(1) \& \overline{MST}(1) \& (WRK(0) \& \overline{VLT} \vee WRK(1) \& \\ &NRY(1) \& (SQ(4) \& EM(4) \vee SQ(3) \& EM(3 \& 4) \vee SQ(2) \& EM(2 \& 3 \& 4)) \vee \\ &\vee WRK(1) \& NRY(2)(SQ(4) \vee SQ(3) \& EM(3 \vee 4) \vee SQ(2) \& \\ &\& EM(i \& k \in \text{mod}_{2-2}(2,3,4)) \vee WRK(2) \& NRY(3) \& (SQ(2) \vee SQ(3) \& \\ &\& EM(2 \vee 3 \vee 4)) \vee WRK(3) \& NRY(4) \& SQ(2)) \rightarrow STA(1), \end{aligned} \quad (4.9)$$

де $WRK(0)$ – режим знеструмленого стану ЕЕС; $EM(3\&4)$ – слід розуміти як $EM(3)\&EM(4)$; $EM(3\vee 4) = EM(3)\vee EM(4)$; $EM(i \& k \in \text{mod}_{2-2}(2,3,4)) = EM(2)\&EM(3)\oplus EM(2)\&EM(4)\oplus EM(3)\&EM(4)$; $MST(1)$ – пам'ять про запуск ГА.

Опис предикату $SP(1)$ розглянемо у рамках чотирьох ситуацій: 1) $CR(1)=I - GA(1)$ у критичній аварії; 2) $WRK(2)\&NRY(1)$; 3) $WRK(3)\&NRY(2)$; 4) $WRK(4)\&NRY(3)$. У якості найсильнішої передумови до формування $SP(1)$, додатково до ситуацій 2–4, віднесемо стан $GA(1)$ останній у черзі, або який перебуває у аварії, якщо при цьому інші ГА у безаварійному стані. Якщо - ні, то, якщо у САЕЕС є інші ГА у аварійному стані, $SP(1)$ формуватися не повинен, принаймні, без втручання оператора. З урахуванням цих умов, $\bigcup_{SP} (1)$ можна описати у такий спосіб:

$$\begin{aligned} \bigcup_{SP} (1) \cong & (SWG(1) \& (CR(1) \vee WRK(2) \& NRY(1) \& ((SQ(2) \vee EM(1)) \& \\ & \& SWG(i \in 2,3,4) \& \overline{EM}(i) \vee SQ(3) \& SWG(i \in 3,4) \& \overline{EM}(i) \vee SQ(4) \& \\ & \& SWG(4) \& \overline{EM}(4)) \vee WRK(3) \& NRY(2) \& (SQ(2) \vee EM(1)) \& \quad (4.10) \\ & \& SWG(i \& k \in \text{mod}_{2-2}(2,3,4)) \& \overline{EM}(i \vee K) \vee SQ(3) \& SWG(3 \& 4) \& \\ & \& \overline{EM}(3 \vee 4)) \vee WRK(4) \& NRY(3) \& (SQ(2) \vee EM(1)) \& \overline{EM}(2 \vee 3 \vee 4)) \rightarrow \\ & \rightarrow SPA(1) \oplus SPQA(1), \end{aligned}$$

де – $SPQA(1)$ команда на екстрену зупинку ДГ, за критичною аварією $CR(1)$.

Однак подібні моделі з однорідними булевими функціями придатні у більшій мірі для побудови пристроїв із твердою логікою й не цілком ефективні при розробці програмованих систем управління. Пояснюється це тим, що з ростом установленної кількості ГА у САЕЕС значно збільшується розмірність програм і ускладнюються завдання, пов'язані з автоматизацією АСУ СТС і К даного класу. Розв'язання відзначеного завдання шляхом пошуку більш компактних булевих функцій викличе певні труднощі, основні з яких є ідентифікація масивів даних. Так, у узагальнених функціях $STA(i)$ і $SPA(i)$ при деяких значеннях індексів m , l , i та інших, з'являються невизначені ідентифікатори, що вимагають при програмуванні введення додаткових умов, переходів. Саме це ускладнює програму, що й збільшує її обсяг.

Для усунення цих недоліків пропонується спосіб алгоритмізації, заснований на використанні спеціального розширеного масиву даних.

Таблиця 4.7 - Розширений масив даних

	Розрахунковий числовий індекс при аргументі									
	1	2	...	$m-1$	m	$m+1$	$m+2$	...	$(2m-1)$	$2m$
Значення аргументів для отриманого числового індексу	$NCR1$	$NCR2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	$NCR1$	$NCR2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$
	$CR1$	$CR2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	$CR1$	$CR2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$
	$EM1$	$EM2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	$EM1$	$EM2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$
	$WRK1$	$WRK2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	$WRK1$	$WRK2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$
	$SQ1$	$SQ2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	$SQ1$	$SQ2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$
	$AUT1$	$AUT2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	$AUT1$	$AUT2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$
	$SWG1$	$SWG2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	$SWG1$	$SWG2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$
	$STA1$	$STA2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	$STA1$	$STA2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$
	$PH1$	$PH2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	$PH1$	$PH2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$
	$OVL1$	$OVL2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	$OVL1$	$OVL2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$
	0	$PD2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	0	$PD2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$
	0	$MIN2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$	0	$MIN2$	...	$\sim (m-1)$	$\sim m$

Використання цього масиву даних дозволяє записати алгоритм функціонування у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
NRY(j) &= (WRK(j) \& \overline{PD}(j) \& \overline{PH}(j) \vee (WRK(j+1) \& PD(j+1) \& \overline{PH}(j)) \& \\
&\& TM1 \vee (WRK(j+m-1) \& PH(j+m-1)) \& TM2 \vee WRK(j+m-1) \& \\
&\& OVL(j+m-1) \vee MIN(j)) \& \overline{MIN}(j+1) \dots \& \overline{MIN}(j+m-1) \\
STA(j) &= AUT(j) \& \overline{EM}(j) \& \overline{SWG}(j) \& (\overline{VLT} \vee NRY(1) \& (SQ(j+m-1) \& \\
&\& EM(j+m-1) \vee SQ(j+m-2) \& EM(j+m-2) \& EM(j+m-1) \vee \dots \vee \\
&\vee SQ(j+1) \& EM(j+1) \& \dots \& EM(j+m-1)) \vee \dots \vee NRY(l) \left(\bigvee_{i=j+m-l+1}^{j+m-1} SQ(i) \vee \right. \\
&\vee SQ(j+m-l) \& \left. \left(\bigvee_{i=j+m-l}^{j+m-1} EM(i) \right) \right) \vee SQ(j+m-l-1) \& \left(\bigvee_{i=1}^{C_{l+1}^2} \Pi_{l+1}^2 \in \right. \\
&\in (C(j+m-l-1) \dots C(j+m-1)) \vee SQ(j+m-l-2) \& \& \left. \bigvee_{i=1}^{C_{l+2}^3} \Pi_{l+2}^3 \in \right. \\
&\in (EM(j+m-l-2) \dots EM(j+m-1)) \vee \dots \vee SQ(j+1) \& \left(\bigvee_{i=1}^{C_{m-1}^{m-2}} \Pi_{m-1}^{m-2} \in \right. \\
&\in (EM(j+1) \dots C(j+m-1)) \vee \dots \vee NRY(m-1) \\
&\left. \left(\bigvee_{i=j+2}^{j+m-1} SQ(i) \vee SQ(j+1) \& \left(\bigvee_{i=j+1}^{j+m-1} EM(i) \right) \right) \right) \vee NRY(m); \\
SPA(j) &= AUT(j) \& SWG(j) \& \left(\bigvee_{i=1}^{m-1} NRY(i) \& SQ(j+m-i) \& \right. \\
&\& \Pi_{j+m-1}^{j+m-1} \in (EM(j) \vee CR(j) \vee NRY(j) \& \bigvee_{i=1}^{m-1} WRK(j+1) \& \overline{PH}(i)) \& \\
&\& \overline{MSP}(j+1) \& \dots \& \overline{MSP}(j+m-1).
\end{aligned}$$

Дані вираження справедливі при $j=1, 2, \dots, m$ і виконанні умов, які відображені у розширеному масиві даних. Наприклад, для функцій $NRY(j)$ при

$j=1$ кон'юнкція $WRK(j) \& \overline{PD}(j) \& \overline{PH}(j)$ буде мати вигляд $WRK(1) \& \overline{PH}(1)$, оскільки значення аргументу OVL до визначено таблицею й рівно 0.

Слід зазначити, що у масиві даних, табл. 4.7 більшість значень аргументів при числових індексах 1 і $(m + 1)$, 2 і $(m + 2)$ і т.д. збігаються. Проте, завдання мінімізації функцій (4.9) і (4.10) на цьому ще не вичерпане. Найбільш ефективний спосіб скорочення функцій криється у створенні раціонального перетворювача $K(N_1) \rightarrow SQ(N_1)$. Аналіз функцій показує, що основне збільшення їх довжини дає відповідність $SQ(N_{GA}) \times EM(N_{GA})$, особливо у тих випадках, коли $|SQ| = m!$. Скоротити це представляється можливим за рахунок розробки самоналаштовуваного перетворювача, що враховує не тільки завдання оператора (вихідна черговість $SQ(i)$, постановка частини ГА на ручне MNL і дистанційне управління й т.п.), але й, що саме основне, що переналаштує задану оператором черговість - залежно від передаварійних і аварійних ситуацій $EM(N_{GA})$.

Цілком очевидно, що потужності множини фізичних порядкових номерів ГА і їх порядкових номерів у черзі N_{QU} рівні, тобто $|N_{GA}| = |N_{QU}| = m$. Причому для даного завдання $N_{QU} = \overline{1, m}$ зафіксуємо строго, а над N_{GA} будемо мати право виконувати які завгодно перестановки. Тоді кожна перестановка $SQ(k \in m!)$ буде пов'язана з N_{QU} певною функціональною відповідністю $QU: N_{QU} \rightarrow N_{GA}$ й множиною предикатів: $QU(N_{QU}, N_{GA}) = \bigcup_{1,1}^{m,m} QU(j, i)$, причому $QU(j, i) = I$, якщо в j -й черзі розташований i -й ГА, $j \in N_{QU}, i \in N_{GA}$. Нехай, наприклад, для п'яти агрегатної САЕЕС задана наступна послідовність: $Q(N_{QU}, N_{GA}) = QU(1,5) \quad QU(2,4) \quad QU(3,2) \quad QU(4,1) \quad QU(5,3)$, причому працює три ГА ($l = 3$), виникла аварія $EM(4)$, а ГА № 2 поставили на ручне управління $MNL(2)$.

У цьому випадку перетворювач QU повинен шляхом операцій зрушення $MVE(N_{GA})$ поставити ГА № 2 першим у черзі, а аварійний - третім, тобто останнім серед працюючих.

Таблиця 4.8 - Приклад завдання послідовності ГА п'яти агрегатної САЕЕС

N_{QU}	1	2	3	4	5
N_{GA}	5	4 EM	2 MNL	1	3

Після відключення $G(4) \neq I$ від шин $GA(4)$ повинен бути поставлений останнім у загальній черзі. У результаті одержимо: $N_{GA} = 25413$ – до відключення $G(4)$ і $N_{GA} = 25134$ – після відключення. У загальному випадку перетворювач має вигляд:

$$\bigcup_{QU} (PR, Q \cup (N_{QU}, N_{GA}), EM(N_{GA})MNL(N_{GA})) \cong MVE(N_{GA}) \rightarrow Q \cup (N_{QU}, N_1),$$

де $MVE(N_{GA})$ – предикат, дійсний по закінченню операцій зрушення нумерацій N_{GA} .

Грунтуючись на властивостях нового перетворювача QU , опишемо предикати $STA(i)$, $SPA(i)$ у загальному виді:

$$\begin{aligned} \bigcup_{SP} (i) &\cong SWG(i) \& (CR(i) \vee \overline{WRK}(1) \& WRK(l) \& (NRY(l-1) \& Q \cup (j=l, i) \vee \\ &\vee \overline{PH}(l-1) \& EM(i) \& \bigvee_{k=1}^{l-1} \overline{EM}(k) \rightarrow SPA(i), k \in N_{QU}, \\ \bigcup_{ST} (i) &\cong \overline{SWG}(i) \& \overline{MST}(i) \& \overline{EM}(i) \& (WRK(0) \vee (WRK(l) \& (NRY(l+1) \vee \\ &\vee NRY(l) \& PH(l-1) \& \bigvee_{k=1}^l EM(k)) \& Q \cup (j=l+1, i) \rightarrow STA(i), \end{aligned}$$

де $\bigvee_{k=1}^l EM(k)$ – диз'юнкція предикатів $EM(k)$, дійсна у тому випадку, якщо хоча б один з l працюючих ГА перебуває у аварійному стані; $\bigvee_{k=1}^l \overline{EM}(k) = I$, якщо жоден з $l-1$ (крім i -го) ГА не перебуває у аварії.

Предикати $STA(i)$, $SPA(i)$, є передумовами до виконання системою програм пуску $PRST$, зупинки $PRSP$ і синхронізації $PRSY$.

Висновки до розділу 4

Четвертий розділ присвячений синтезу процесів базового управління верхнього рівня складних ТС і К судна. Запропоновано семантику і декомпозицію реалізованих завдань управління складних судових ТС і К.

1. На прикладі п'яти агрегатної автоматизованої СЕЕС проведено узгодження рівнів генерованої потужності й потужності, необхідної у теперішній момент часу. Показано процедуру переходу від одного рівня генерованої потужності до іншого з урахуванням критеріїв ефективності. Запропоновано управління складом ГА з урахуванням передаварійних і аварійних станів СЕЕС і керуючих впливів від оператора. Наведено організацію процесу послідовності включення/відключення ГА з урахуванням аварійних станів ГА і керуючих впливів від оператора.

2. Наведено запропоновану послідовність синтезу алгоритмів програми управління супервізора координатора системи управління, де у якості системи управління обрано багатомашинну МП-систему з розподіленою дворівневою ієрархічною структурою. Наведені структура і інформаційні зв'язки системи управління. З урахуванням вимог до досліджуваних САЕЕС визначено, що клас жорстко запропонованих принципом зосередження функцій управління систем повинен бути доповнений властивостями адаптації й оптимізації. При визначенні поточного значення верхнього порога завантаження САЕЕС передбачено урахування впливу метеорологічних умов плавання судна.

3. Розв'язано завдання координованого управління СЕЕС при змінах навантаження. Наведена узагальнена структура перетворювача для управління складом ГА. Наведені принципи побудови процедур управління складом ГА за принципом "жорстких і гнучких" порогів, наведена діаграма корегування часової затримки включення ГА від затребуваної потужності. Доведено, що запропонований спосіб підвищує надійність роботи САЕЕС, оскільки виключені можливі аварійні режими при завданні помилкових комбінацій управління: послідовності включення ГА при неповності зазначеній комбінації, при незазначеній послідовності, при вказівці одного ГА кілька раз у

одній послідовності й при збігу двійкових наборів різних комбінацій послідовності включення ГА у СЕЕС.

4. Запропоновано САУ СЕЕС за умови мінімуму витрати палива та з урахуванням метеорологічних умов плавання. Визначено коефіцієнт перерахування залежності зміни індикаторної потужності з обліком механічного ККД. Синтезовані алгоритми оптимізації режимів роботи дизелів, якщо система містить усі необхідні датчики (вологості повітря, температури вихлопних газів, сигнали виконавчих органів управління подачею води для охолодження наддувочного повітря й подачею палива). Показана можливість визначення, за умовами оптимальності розподілу навантаження, нижні пороги завантаження СЕЕС.

5. Сформовані бази даних, що визначають кількість працюючих ГА, їх технічний стан, навантаження, витрату палива й параметри навколишнього середовища. Проведено аналіз навантажувальних характеристик агрегатів і формування бази даних для розрахунків з оптимізації режиму. Визначені коефіцієнт перерахування потужності й корегування верхніх порогів завантаження з умов технічного стану й метеорологічних умов. Показана послідовність визначення сумарного навантаження СЕЕС, наведено аналіз еквівалентних характеристик витрати палива й вибір оптимального, за критерієм мінімуму витрати палива, складу ГА з урахуванням обмежень за верхніми і нижніми порогами завантаження.

6. Наведена послідовність виконання операцій пуску, синхронізації, переведення навантаження й зупинки ГА, пов'язаних з формуванням оптимального складу ГА, розподіл навантажень між паралельно працюючими ГА за умовами $F_{\Sigma} \min(P_{\Sigma})$ і виконання програми оптимізації первинного двигуна електростанції, що реалізує критерій $(\alpha_c - \alpha_{opt}) \rightarrow \min$. При синтезі управління САЕЕС у нормальних і аварійних режимах роботи (на прикладі п'яти агрегатної САЕЕС) запропоновано спосіб алгоритмізації, заснований на використанні спеціально розширеного масиву даних, який дозволяє суттєво спростити алгоритм функціонування САЕЕС у операціях обрання її складу. Доведена ефективність запропонованих рішень.

РОЗДІЛ 5. УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ НИЖНЬОГО РІВНЯ У ІЄРАРХІЧНИХ РОЗПОДІЛЕНИХ СТС І К (НА ПРИКЛАДІ САЕЕС)

5.1. Аналіз структур розподілених систем управління СТС і К

Досліджувана структура розподіленої системи АСУ ГА являє собою об'єднання $S = \bigcup_{i=1}^m LS(i) \cup LC$ декількох локальних підсистем (ЛП) на нижньому рівні за числом ГА (m) і одного локального координатора (ЛК) на верхньому рівні [195-199, 266-270]. Вироблення впливів управління $Y(i)$ здійснюється обробкою вхідної інформації $X(i)$, що надходить від об'єктів управління і координаційних команд $C(i)$ від локального координатора LC , тобто $LS(i): X(i) \times C(i) \rightarrow Y(i)$. Крім того, кожна ЛП формує інформацію $Z(i)$ для передачі координаторові, тобто $LS(i): X(i) \times C(i) \times Y(i) \rightarrow Z(i)$. Оскільки $X(i)$ й $Y(i)$ визначені раніше, то установимо тільки безлічі $Z(i)$ і $C(i)$ [195-199]:

$$Z(i) = \{AUT(i), MNL(i), INH(i), REV(i), MST(i), MSTQ(i), \\ MSP(i), MSPQ(i), MEM(i), LS(i, j)\};$$

$$C(i) = \{ST(i), STQ(i), SP(i), MSY(i), MUNL(i), MSH(i)\},$$

де $AUT(i), MNL(i), INH(i)$ – предикати автоматичного, ручного, заблокованого управління, відповідно; $REV(i) = (REV_i(0), REV_i(1), REV_i(2))$ – предикати, що характеризують пороги частоти обертання ГА (стоянка, мінімально стійкі та номінальні оберти); $MST(i), MSTQ(i), MSP(i), MSPQ(i), MEM$ – пам'ять пуску, екстреного пуску, стопу, екстреного стопу, аварії; $LS(i, j)$ – j -й стан, у якому перебуває i -й ГА на момент передачі інформації; $ST(i), STQ(i), SP(i), MSY(i), MUNL, MSH$ – команди, що посиляє координатор у підсистему для виконання програм пуску $PRST$, екстреного пуску $PRSTQ$, зупинки $PRSP$, синхронізації $PRSY$, скидання навантаження $PRUNL$, розподілу навантажень $PRSH$.

З урахуванням викладеного, а також результатів синтезу алгоритмів програм супервізора і прикладних програм координатора (розд. 3 і 4), представимо систему програмного забезпечення $SPR(MS)$ системи управління дворівневою (HL – верхній, DL – нижній) у вигляді наступних об'єднань:

$$\begin{aligned} SPR(MS) &= SPR(HL) \cup SPR(DL); \\ SPR(HL) &= PRSV(HL) \cup PRTRM(HL); \\ SPR(DL) &= PRSV(DL) \cup PRTRM(DL); \\ PRSV(HL) &= \bigcup_{i=1}^{18} SBLC(i); \quad PR(DL) = \bigcup_{i=1}^m RPSV(LS(i)); \\ PRSV(LS(i)) &= \bigcup_{j=0}^n SBLs(i, j) \end{aligned}$$

де $SPR(HL)$ и $SPR(DL)$ – системи ПЗ верхнього й нижнього рівнів; $PRSV(HL)$ и $PRSV(DL)$ – управляючі програми (супервізор) координатора і підсистеми нижнього рівня; $PRTRM(HL)$ і $PRTRM(DL)$ – пакети прикладних програм верхнього і нижнього рівнів, їх змісти представлені на рис. 5.1.

Такий підхід до організації структури програмного забезпечення (ПЗ) буде відповідати принципу лабілізації й модульності, сформульованому у розділах 1 і 2, що додасть системі гнучкість у процесі налагодження й експлуатації, дозволить без особливих витрат здійснювати корекцію або розширення функцій, розміщати у пам'яті модулі незалежно [266-270].

Основний зміст пакету прикладних програм (ППП) нижнього ієрархічного рівня $SPR(DL)$ припадає на програми пуску $PRST$, зупинки $PRSP$, синхронізації $PRSY$, розподілу навантажень $PRSH$, переведення навантаження $PRUNL$, і підтримки гарячого резерву $PRHR$.

Відзначимо, що за складністю розв'язання завдань синтезу алгоритмів управління даними процесами до найбільш трудомістких відноситься синтез оптимального управління процесом синхронізації. У зв'язку із цим дослідженню даного завдання відведені окремі параграфи.

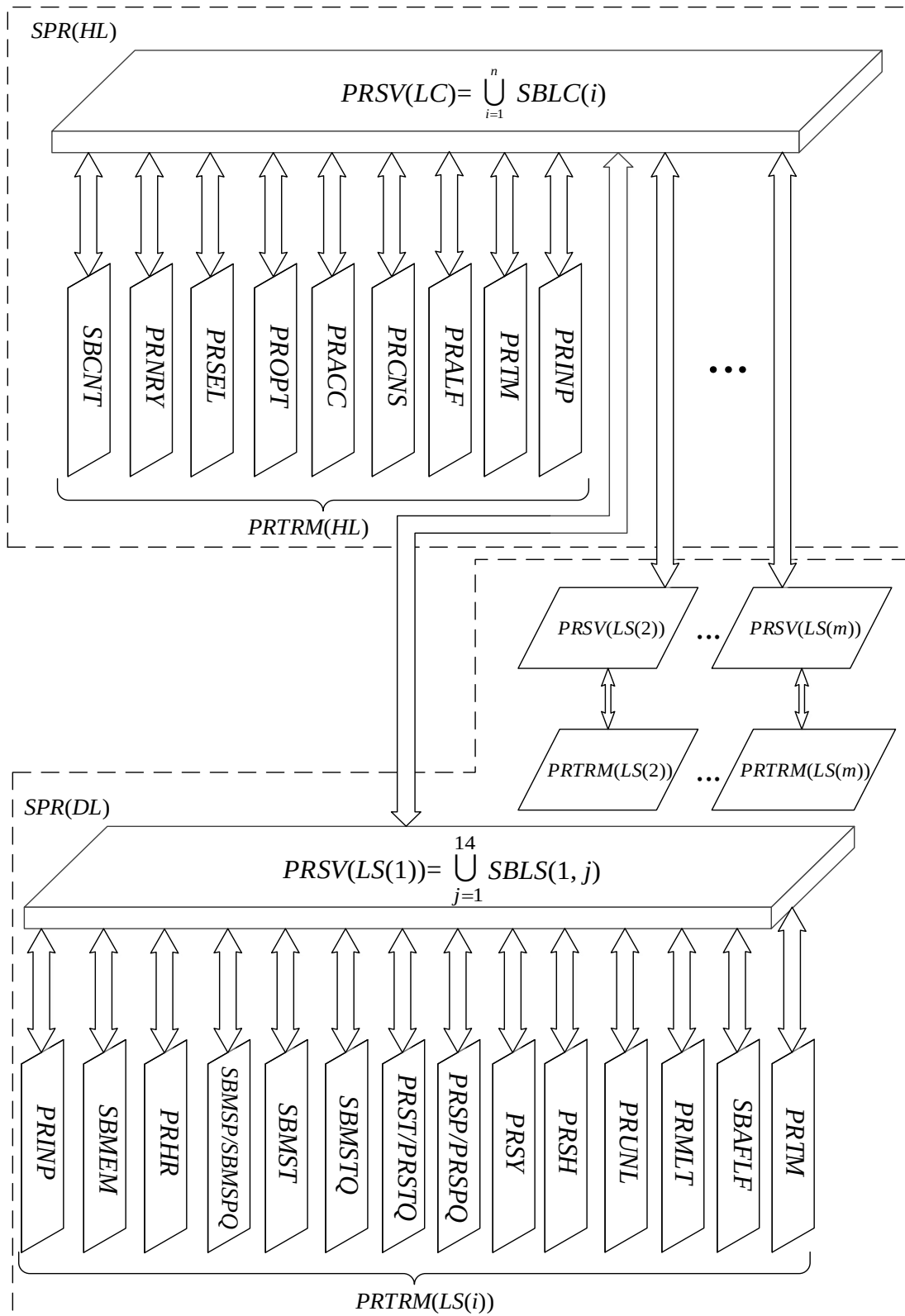


Рис. 5.1. Структура ПЗ системи управління t -агрегатною САЕЕС

Постановку і особливості розв'язання інших завдань розглянемо далі.

5.2. Особливості синтезу алгоритмів ПЗ супервізора локальних підсистем управління

Відповідно до прийнятого принципу функціонально-структурної ієрархії АСУ, кожна локальна підсистема $LS(i)$ повинна бути активним елементом, для якого має місце строга періодичність вибірки даних про стан керованого об'єкта $GA(i)$ й даних, що надходять від локального координатора відповідно до протоколів обміну (розд. 1 і 2). Організацію періодичного обслуговування введемо у перелік завдань програми супервізора $PRSVRLS(i)$ локальної підсистеми $LS(i)$. У якості способу організації оберемо спосіб переривання з періодом дискретності $T_{\text{ЦЦ}}(LS)$, при якому супервізор у кожному новому $t + 1$ такті повинен проаналізувати вхідну інформацію й визначити шлях переходу об'єкту/процесу у новий, або зберегти поточний, стан.

Перший етап синтезу виконаємо за допомогою графів станів, рис. 5.2, 5.3. Обидва графи повністю задані ($N_{GR}(ДГ) = \overline{0,13}$; $N_{GR}(ВГ) = \overline{0,9}$) і відносяться до класу неоднорідних. Кожна вершина графів зіставлена із цілком певним предикативним станом $LS(i, j), i \in N_m, N_m = \overline{1,4}$, причому $j \in \overline{0,13}$ для ДГ, а $j \in \overline{0,8}$ – для валогенераторної локальної підсистеми.

Термін “предикативний стан” і процедура породження предикативного алфавіту визначені раніше, тому приступимося до синтезу множини слів оз-

нак $\bigcup_{j=1}^{13} LS(i, j), i \in \overline{1,4}$ станів дизель-генераторної локальної підсистеми.

Стан $LS(i, 0), i \in \overline{1,3}$ поставимо у відповідність випадку, коли i -ий ДГ або заблокований $INH = I$ або обраний ручний $MNH = I$ вид управління, або зупинений у зв'язку з аварією $MEM = I$ й при кожній із цих трьох умов частота обертання ДГ дорівнює нулю $REV(0) = I$.

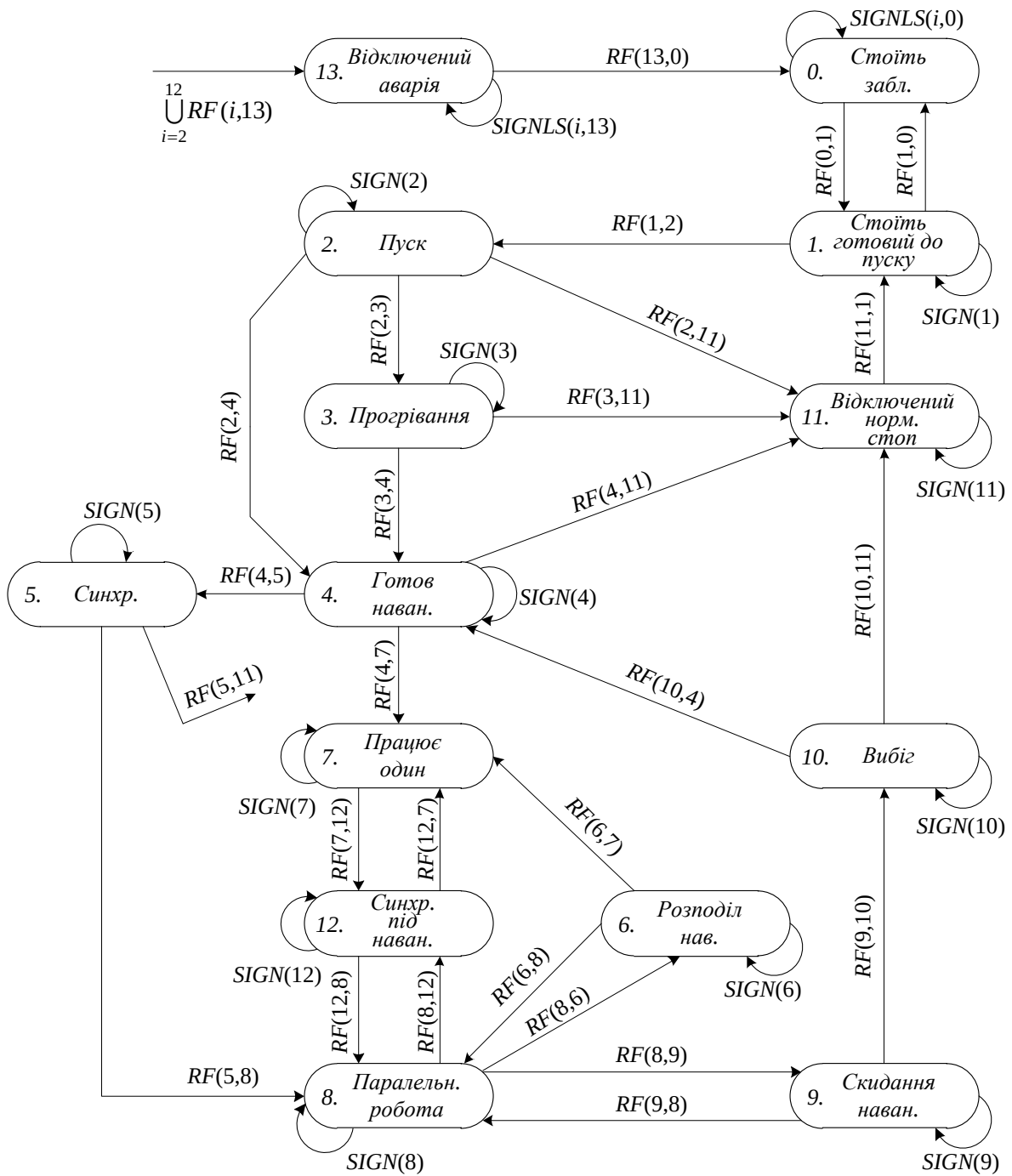


Рис. 5.2. Граф стану дизель-генераторної локальної підсистеми управління

Породження предикатів $\{INH, MNL, REV\}$ пов'язане з обробкою сигналів, що надходять від органів управління й датчика обертів, а предикат $MEM(t+1)$ зв'яжемо з узагальненою аварією $EM(N_{GA}, N_{EM})$ у $(t+1)$ -му такті, її пам'яттю у t -му такті $MEM(t)$ й положенням сигналу скидання у $(t+1)$ -му такті $RST(t+1)$.

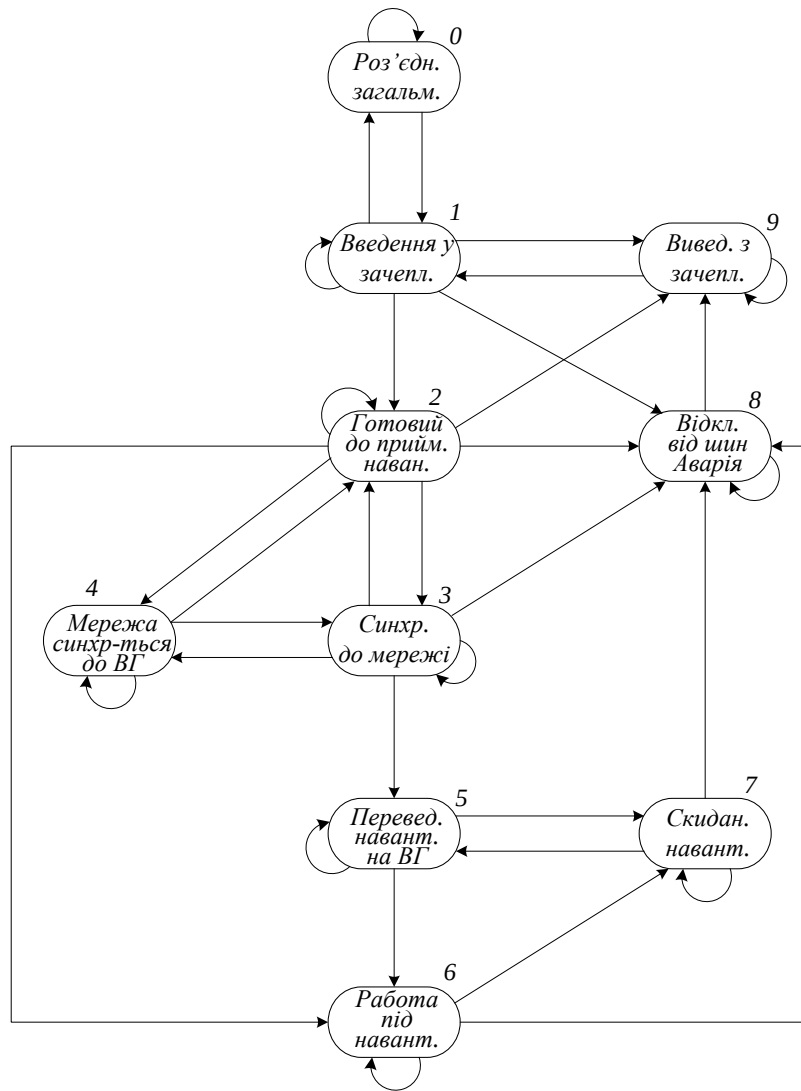


Рис. 5.3. Граф стану валогенераторної підсистеми

З урахуванням викладеного та [195, 196] результатна функція $RFMEM$, що породжує пам'ять аварії $WRMEM$, запишемо так:

$$RFMEM \cong \left(\bigvee_{i,k=1}^{m(n+c)} x(i,k) \vee MEM(t) \& \overline{RST}(t+1) \right) \rightarrow WRMEM,$$

а правило встановлення стану $LS(i,0)$ запишемо у вигляді:

$$RFLS(i,0) \cong (INH \vee MHL \vee MEM) \& REV(0) \rightarrow LS(i,0).$$

Другий стан $LS(i,0)$ “ДГ зупинений і готовий до пуску” повинен характеризуватися хибністю всіх трьох предикатів $INH \vee MHL \vee MEM \neq I$, істинністю $REV(0)$ й відсутністю пам'яті нормального $MST(t+1)$ і екстреного

$MSTQ(t+1)$ пуску ДГ, тобто ознаку стану $LS(i,1)$ можна описати словом $SIGNLS(i,1) = \overline{INH} \& \overline{MNL} \& \overline{MEM} \& REV(0) \& \overline{MST} \& \overline{MSTQ}$. Тут виникає завдання синтезу функцій, що породжують предикати  й $MSTQ$. Для його розв'язання визначимо предикативний алфавіт у вигляді набору $\{ST(t+1), STQ(t+1), MST(t+1), MSTQ(t+1), SP(t+1), SPQ(t+1), MSP(t+1), MSPQ(t+1), CR(t+1)\}$, у який входять як предикати пуску, так і зупинки, оскільки породження їх є взаємозалежним. Причому, у окремих випадках, за інших рівних умовах, перевага повинна віддаватися породженню предикатів зупинки. З урахуванням цих умов запишемо систему результатних функцій:

$$RFMSPQ \cong MSPQ(t) \vee SPQ(t+1) \vee MEM(t+1) \& CR \rightarrow WRMSPQ;$$

$$RFMSP \cong (MSP(t) \& \overline{ST}(t+1) \vee SP(t+1)) \rightarrow WRMSP;$$

$$RFMSTQ \cong (MSTQ(t) \vee STQ(t+1) \& \overline{MSPQ}(t+1) \& \overline{MSP}(t+1)) \rightarrow WRMSTQ;$$

$$RFMST \cong (MST(t) \vee ST(t+1) \& \overline{MSPQ}(t+1) \& \overline{MSP}(t+1)) \rightarrow WRMST,$$

де CR – предикат, пов'язаний із критичною аварією ГА.

Перехід $LS(i,1) \rightarrow LS(i,2)$ пов'яжемо з породженням одного з предикатів $MST \oplus MSTQ = I$, а до ознак стану $LS(i,2)$ віднесемо відсутність сигналу про вдалий пуск $REV(1) \neq I$ і сигналу про витікання часу, відведеного на пуск дизелю $BST \neq I$. У такому випадку повне слово-ознака стану $LS(i,2)$ буде мати наступний вигляд: $SIGNLS(i,2) = (MSTQ \vee MST \& \overline{REV}(1) \& \overline{BST})$.

Отримані результатні функції й слова-ознаки дають можливість визначити структуру алгоритмів підпрограм $SBLS(i,0)$ і $SBLS(i,1)$ супервізора локальної підсистеми:

$$SBLS(i,0) = S_{\Pi}\{SBINP.SBMEM\}.SIGNLS(i,0) \overset{1}{\uparrow} \omega \overset{K}{\uparrow} \overset{1}{\downarrow} SIGNLS(i,0) \overset{2}{\uparrow}$$

$$WRLS(i,1) \omega \overset{K}{\uparrow} \overset{2}{\downarrow} JPRCLS \overset{K}{\downarrow} S_K$$

$$SBLS(i,1) = S_{\Pi}\{SBINP.SBMEM.SBMST.SBMSTQ\}.SIGNLS(i,1) \overset{1}{\uparrow}$$

$$\omega \overset{K}{\uparrow} \overset{1}{\downarrow} SIGNLS(i,0) \overset{2}{\uparrow} WRLS(i,0) \omega \overset{K}{\uparrow} \overset{2}{\downarrow} SIGNLS(i,2) \overset{3}{\uparrow} WRLS(i,2).$$

$$WRBST.JPRST. \omega \overset{K}{\uparrow} \overset{1}{\downarrow} JPRCLS \overset{K}{\downarrow} S_K,$$

де пошук станів детерміновано дозволеними переходами графу. Якщо ж перебір дозволених переходів вичерпаний, то алгоритм зводиться до програми *PRCLS* визначення поточного стану.

Якщо тепер умові переходу $LS(i,2) \rightarrow LS(i,3)$ поставити у відповідність вдалий запуск $REV(1) = I$ і недостатню для прийняття навантаження температуру мастила $TOLMN \neq I$, а також обмежити процес прогріву часом $BLS(i,3)$, то слово-ознака стану $LS(i,3)$ буде мати вигляд:

$$SIGNLS(i,3) = (MSTQ \vee MST) \& REV(1) \& \overline{TOLMN} \& \overline{BLS(i,3)}.$$

Зі стану $LS(i,2)$ можливий перехід у $LS(i,13)$, якщо з'явилася необхідність зупинки $MSP = I$ ДГ у зв'язку з його аварією $MEM = I$ або командою на екстрену $MSPQ = I$ зупинку. Якщо врахувати той факт, що ДГ при цьому відключений від ГПЦ $SWG \neq I$ і має деяку частоту обертання, пов'язану з пуском, то слово-ознака стану $LS(i,13)$ буде мати вигляд:

$$SIGNLS(i,13) = \overline{SWG} \& \overline{REV(0)} \& (MSP \& MEM \vee MSPQ).$$

Відмінити пуск можна, також при нормальних умовах, командою оператора $MSP = I$. У цьому випадку система повинна перейти у стан $LS(i,11)$, ознаку якого опишемо наступним словом:

$$SIGNLS(i,11) = (\overline{SWG} \& \overline{REV(0)} \& \overline{MEM} \& \overline{MSPQ} \& MSP).$$

При екстреному запуску можливий прямий перехід з $LS(i,2)$ в $LS(i,4)$, ознаками якого є відсутність команд на зупинку ДГ, наявність номінальної частоти обертання $REV(2) = I$ й напруги $VLT = I$, на відсутність синхронізації $MSY \neq I$, тобто:

$$SIGNLS(i,4) = \overline{SWG} \& \overline{MSY} \& \overline{MSP} \& \overline{MSPQ} \& REV(2) \& VLT$$

З урахуванням викладеного, алгоритм підпрограми $SBL(i,2)$ супервізора представимо у вигляді наступної ЛСА.

$$\begin{aligned}
SBL(i,2) = S_{\Pi} \{SBINP.SBMEM.SBMSPQ.SBMSP.SBMSTQ\}.SIGNLS(i,2) \overset{1}{\uparrow} \\
JPR(ST \vee STQ) \overset{K}{\omega} \overset{1}{\uparrow} \downarrow SIGNLS(i,3) \overset{2}{\uparrow} WRLS(i,3).JPR(ST \vee STQ) \overset{K}{\omega} \overset{1}{\uparrow} \\
SIGNLS(i,11) \overset{3}{\uparrow} WRLS(i,11).JPR(SP \vee SPQ) \overset{K}{\omega} \overset{3}{\uparrow} \downarrow SIGNLS(i,4) \overset{4}{\uparrow} \\
WRLS(i,4) \overset{K}{\omega} \overset{4}{\uparrow} \downarrow SIGNLS(i,13) \overset{5}{\uparrow} WRLS(i,13).JPR(SP \vee SPQ) \overset{K}{\omega} \overset{4}{\uparrow} \\
\downarrow \overset{5}{JPRCLS} \downarrow \overset{K}{S_K}.
\end{aligned}$$

Із цієї ЛСА бачимо, що модуль $SBL(i,2)$ тісно пов'язаний із програмами пуску й зупинки дизель-генератора. У стан $LS(i,5)$ з $LS(i,4)$ локальна підсистема може перейти тільки з дозволу ЛК за сигналом $MSY = I$. При цьому повинні бути відсутніми предикати зупинки ДГ, тобто:

$$SIGNLS(i,5) = REV(2) \& VLT \& MSY \& \overline{SWG} \& \overline{MSP} \& \overline{MSPQ}.$$

У випадку знеструмлення ГРЩ до шин підключається той ДГ, який перший готовий до приймання навантаження. Тому з $LS(i,4)$ можливий перехід у $LS(i,7)$ без синхронізації. Слово-ознаку стану $LS(i,7)$ запишемо як:

$$SIGNLS(i,7) = SWG \& WRK(1) \& \overline{MSY},$$

де $WRK(1)$ й MSY – предикати, що надходять у локальну підсистему з координатора у режимі обміну інформацією. З урахуванням викладеного одержимо наступні алгоритми управління:

$$\begin{aligned}
SBL(i,3) = S_{\Pi} \{SBINP.SBMEM.SBMSPQ.SBMSP.SBMSTQ\}. \\
SIGNLS(i,3) \overset{1}{\omega} \overset{4}{\uparrow} \downarrow JPR(ST \vee STQ) \overset{K}{\omega} \overset{1}{\uparrow} \downarrow SIGNLS(i,11) \overset{2}{\uparrow} WRLS(i,11). \\
JPRSP \overset{K}{\omega} \overset{2}{\uparrow} \downarrow SIGNLS(i,13) \overset{3}{\uparrow} JPR(SP \vee SPQ).WRLS(i,13) \overset{K}{\omega} \overset{3}{\uparrow} \\
\downarrow \overset{3}{(TOLMN \vee BLS(i,3))} \overset{5}{\omega} \overset{4}{\uparrow} \downarrow \overset{5}{JPRCLS} \downarrow \overset{K}{S_K}. \\
SBL(i,4) = S_{\Pi} \{SBINP.SBMEM.SBMSPQ.SBMSP\}.SIGNLS(i,4) \overset{1}{\uparrow} \\
BLC \overset{K}{\omega} \overset{1}{\uparrow} \downarrow \overset{K}{ONSWG} \overset{K}{\omega} \overset{1}{\uparrow} \downarrow SIGNLS(i,5) \overset{2}{\uparrow} WRLS(i,5).JPRSY \overset{K}{\omega} \overset{1}{\uparrow} \\
\downarrow \overset{2}{SIGNLS(i,7)} \overset{3}{\uparrow} WRLS(i,7) \overset{K}{\omega} \overset{3}{\uparrow} \downarrow \overset{K}{SIGNLS(i,11)} \overset{4}{\uparrow} WRLS(i,11) \\
\overset{K}{\omega} \overset{4}{\uparrow} \downarrow \overset{5}{SIGNLS(i,13)} \overset{5}{\omega} \overset{4}{\uparrow} \downarrow \overset{K}{WRLS(i,13)} \overset{K}{\omega} \overset{5}{\uparrow} \downarrow \overset{K}{JPRCLS} \downarrow \overset{K}{S_K},
\end{aligned}$$

де BLC – предикат, що свідчить про відсутність напруги на шинах ГРЩ.

Стан $LS(i,5)$ супроводжується виконанням процесу синхронізації, який може бути відміненим у зв'язку з аварією синхронізованого ГА, командами оператора на зупинку або невдалої за часом BSY синхронізації. У цьому випадку процес переходить або у $LS(i,13)$, або у $LS(i,11)$. При вдалій синхронізації система переходить у стан $LS(i,8)$, що характеризується ознакою:

$$SIGNLS(i,8) = \overline{WRK}(1) \& SWG \& \overline{MSH} \& \overline{MUNL} \& \overline{MSY},$$

тобто, i -ий ДГ підключений до ГРЩ $SWG = I$ і він не один $WRK(1) \neq I$, і при цьому від координатора не зроблена команда на розподіл $MSH \neq I$ або скидання $MUNL \neq I$ навантаження, а також на синхронізацію (наприклад, до валогенератору) під навантаженням. Перехід від $LS(i,8)$ до $LS(i,6)$ відбувається за рішенням координатора $MSH(i,k) = I$. Стан $LS(i,6)$ буде характеризуватися ознакою $SIGNLS(i,6) = \overline{WRK}(1) \& SWG \& MSH$, тобто до ГРЩ повинен бути підключений крім i -го ГА $SWG(i) = I$ ще принаймні один ГА $WRK(1) \neq I$. Перехід від $LS(i,8)$ до $LS(i,6)$ ініціюється командою $MUNL(i,k)$ при цьому $SIGNLS(i,9) = \overline{WRK}(1) \& SWG \& MUNL(i,k)$. Від процесу скидання навантаження (при відключенні i -го ГА від шин) підсистема може перейти або у режим вибігу $LS(i,10)$ при нормальній зупинці, або у стан $LS(i,13)$ - при аварійній зупинці. Основними прикладними програмами, до яких постійно звертається програма супервізора локальної підсистеми є програми пуску $PRST$, зупинки $PRSP$ й синхронізації $PRSY$. Особливостям їх синтезу присвячені наступні параграфи.

5.3. Процеси пуску та зупинки дизель-генераторів у розподілених МП-системах управління СТС і К

Завдання розглянемо на прикладі процесів роботи суднового ДГА. Пусковий режим роботи дизеля характеризується різкими змінами теплових і динамічних навантажень. Сприяють пуску дизеля висока якість розпилу па-

лива й прогрів дизеля перед пуском. Переохолодження пускового повітря у результаті його розширення у циліндрі впливає на робочі процеси дизеля, викликаючи високі швидкості наростання тиску ($\Delta P / \Delta \varphi = 1200 \div 1500$ кПа/град, де φ – кут положення кривошипу від ВМТ), що приводить до підвищених динамічних навантажень у двигуні при пуску. Статистика відмов і аварій дизелів свідчить, що найбільше їхнє число припадає на перехідні режими пуску.

Криві розгону дизелю повітрям можуть бути отримані розрахунковим шляхом, якщо звернутися до рівняння руху [280]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_p(\varphi, t) - M_o,$$

де J – приведений момент інерції ДГ, M_p – рушійний момент, кНм; M_o – момент опору, кНм; φ – кут положення кривошипа від ВМТ, град.

Рушійний момент можна представити у вигляді рівняння

$$M_p = A \sin \varphi + B \sin 2\varphi,$$

де $A = P_{\Pi} V_0$; $B = \lambda 2 P_{\Pi} V_0$; $V_0 = F \cdot r$; $\lambda = r/L$; P_{Π} – початковий тиск повітря у циліндрі у перший момент зрушення поршня, кПа; F – площа поршня, м²; r – радіус кривошипу, м; L – довжина шатуна, м;

Оскільки повітря надходить одночасно у декілька циліндрів, то число пускових порожнин, що працюють одночасно, визначається вираженням $m = (\varphi_2 - \varphi_1) / 2\pi$ де φ_2, φ_1 – кут від ВМТ відповідно кінця закриття й початку відкриття пускового клапану; i – число циліндрів двигуна. Тому процес розгону дизеля можна описати виразом:

$$M_p = A \sum_i \sin \varphi_i + B \sum_i \sin 2\varphi_i.$$

Зниження негативних впливів динаміки пуску на дизель досягають шляхом підтримки певного теплового режиму і періодичного мастилопрокачування, забезпечуючи у такий спосіб постійну готовність дизеля до пуску. Відповідно до інструкцій, пуск дизеля допускається при температурі мастила не нижче 8–15 °С, а прийняття навантаження не нижче 30–40 °С. Конкретні

значення залежать від типу дизеля і від сорту мастила, використовуюваного у системі мащення і граничного навантаження підшипників дизеля. Підігрів мастила і води у внутрішньому контурі системи охолодження здійснюється при одночасному прокачуванні їх через дизель. При цьому управління електромагнітними клапанами підігріву пов'язують звичайно з кінцевими (початковими) станами процесів пуску/зупинки дизеля.

Прокачування мастила залежно від виду управління (ручне MNL ; автоматичне AUT) може бути безперервним $MNL = I$ або циклічним $AUT = I$, $AUT \oplus MNL$. При ручному - команди на пуск ST_{LB} , зупинку SP_{LB} насоса мастилопрокачування надходять у перетворювач від відповідних кнопок, причому бажане, щоб оператор виконував умову $ST_{LB} \oplus SP_{LB}$. Проте, у перетворювачі повинно бути передбачене блокування можливих помилок оператора або несправностей схем зовнішніх з'єднань із пріоритетом на зупинку.

Прийнявши у якості передумов до результатної функції $\bigcup_{HR}$ шуканого перетворювача предикати ON_{LB} й OF_{LB} , що обумовлюють формування команд на включення й відключення насоса прокачування мастила, запишемо

$$F(X_{HR}) \equiv \bigcup_{LB} (PRHR, V_{LB}, t) \rightarrow ON(LB) \oplus OF(LB),$$

де $PRHR$ – програма управління гарячим резервом; X_{HR} – вектор вхідної інформації, причому $X_{HR} = (ST(LB), SP(LB), AUT, MNL, P_{LB}, LB_{ON}, t)$; V_{LB} – множина найсильніших передумов, які необхідно визначити; P_{LB} – тиск мастила; LB_{ON} – сигнал від блок-контакту контактора, що включає електродвигун прокачування.

Приступимо до визначення вектору V_{LB} . Якщо при ручному управлінні тривалість T_{ST} роботи насоса й паузи T_{SP} визначаються розподілом команд $ST(LB)$, $SP(LB)$ у часі, що повністю залежить від оператора, то при автоматичному управлінні T_{ST} й T_{SP} повинні бути детерміновані й контроль їх змінювання є основною функцією перетворювача $\bigcup_{LB}$. Тому уведемо у вигляді предикатів $TST(LB)$, $TSP(LB)$ найслабкіші постумови перетворювача

$\cup_{TLB}$, що відслідковує часові інтервали й формує $TST(LB) \oplus TSP(LB) = I$ після закінчення відповідних їм часових інтервалів.

Установимо, також, правило, згідно якому після закінчення часу T_{LBP} на ділянці T_{ST} , що відслідковується з моменту $ON(LB) = I$, необхідно проконтролювати тиск P_{LB} мастилопрокачування й зробити висновок про вдале $P(LB) = I$ або невдале $P(LB) \neq I$ прокачування мастила. Якщо за час T_{LBP} мастилопрокачування не вдалося, то необхідно встановити діагноз несправності глибиною “електрична схема або силова електромеханічна частина” шляхом обстеження предиката $LBON$, що характеризує стан контактора електродвигуна мастилопрокачування. Тобто, якщо $LBON = I$, а $P(LB) \neq I$, то контактор включений, схема справна, але несправна силова електромеханічна частина, а якщо ні, то несправна схема включення. У першому випадку перетворювач повинен сформулювати предикат $LBFM = I$, у другому $LBFE = I$, за умови $LBFM \oplus LBFE = I$.

Таким чином, у масив змінних X_{HR} повинні входити, також, значення часових інтервалів $T_{ST}, T_{SP}, T_{LBP}, \Delta T_{CNT}$ у одиницях часу або у відносних еквівалентах $B_{ST}, B_{SP}, B_P, B_{BNT}$, де $B_{ST} = T_{ST} / \Delta T_{CNT}$;

$B_{SP} = T_{SP} / \Delta T_{CNT}$; $B_P = T_{LBP} / \Delta T_{CNT}$; $B_{CNT} = \Delta T_{CNT} / \Delta T_{CNT}$ – одиниця рахування. Тут, як і у інших програмах приймемо $\Delta T_{CNT} = K_{TM} T_{TЦ}$, де $T_{TЦ}$ – час основного програмного такту; K_{TM} – коефіцієнт, за допомогою якого можна варіювати часовими інтервалами. Результатну функцію перетворювача $\cup_{TLB}$, що відслідковує часові інтервали, запишемо у вигляді

$$F_{TLB}(T_{ST}, T_{SP}, T_{LBP}, \Delta T_{CNT}, K_{TM}, T_{TЦ}, t) \cong \cup_{TLB}(PRTM, B_{ST}, B_{SP}, B_P, B_{CNT}, T_{TЦ}, t) \rightarrow \{TST(LB), TSP(LB), TP(LB)\},$$

а правило відстеження й породження предикатів у вигляді циклічної інструкції:

while $PRTM \& B_i$ do : if $B_i(t+1) - B_{CNT} = 0$ then $T_i(LB)$
else fi od, $i \in (ST, SP, P)$.

Оскільки команди $ST(LB)$, $SP(LB)$ імпульсного характеру, то виникає необхідність їх запам'ятовування, скидання пам'яті, а також блокування, що забезпечує умова породження $MST \oplus MSP$, де MST , MSP – пам'ять "старту" і пам'ять "стопу", відповідно. Тому результатні функції їх перетворювачів $\bigcup_{MST}, \bigcup_{MSP}$ повинні мати вигляд:

$$\begin{aligned} F_{MST}(X_{LB}, F_{TLB}) &\cong MNL \& (\overline{MSP}(t+1) \& (MST(t) \vee ST(t+1) \vee AUT \& \\ &\& (MST(t) \& \overline{TST}(LB) \vee \overline{MST}(t) \& TSP(LB))) \xrightarrow{PR_{MST}} MST(LB) \\ F_{MSP}(X_{LB}, F_{TLB}) &\cong MNL \& (SP(t+1) \vee MSP(t) \& \overline{ST}(t+1)) \vee \\ &\vee AUT \& (MSP(t) \& TSP(LB) \vee \overline{MSP}(t) \& TST(LB)) \xrightarrow{PR_{MSP}} MSP(LB). \end{aligned}$$

Для виключення збоїв у управлінні, що можливо при переході з ручного на автоматичний вид, необхідно передбачити попередню установку $TSP(LB) = I$, $TST(LB) \neq I$, шляхом обнуління комірки, що зберігає поточне значення числа B_{SP} , і записи повного числа B_{ST} . Перетворювач контролю вдалого мастилопрокачування й діагностики системи, з урахуванням сформульованих вище умов, запишемо у вигляді наступної результатної функції:

$$\begin{aligned} \bigcup_{MEM}(LB)(PR_{MEM}, AUT, MST, TPLB, PLB, LBON) &\rightarrow \\ &\rightarrow MEM(LB), LBFM \oplus LBFE, \end{aligned}$$

а правило породження предикатів у вигляді інструкції

$$\text{if } AUT \& MST \& TPLB \& \overline{PLB} \& LBON \text{ then } LBFM, MEM(LB)$$

$$\text{else if } AUT \& MST \& TPLB \& \overline{PLB} \& \overline{LBON} \text{ then } LBFE, MEM(LB) \text{ else fi,}$$

де $MEM(LB)$ – предикат, що підтверджує аварію мастилопрокачування.

Таким чином, визначені правила породження всіх найсильніших передумов, що входять у множину

$$V_{LB} = (MST(LB), MSP(LB), TST(LB), TSP(LB), TP(LB), PLB, MEM(LB)),$$

що надає можливість, застосовуючи ЛСА, синтезувати повний алгоритм управління й контролю мастилопрокачування

$$\begin{aligned}
PRLB &= S_{\Pi} \overset{K}{AUT} \overset{1}{\uparrow} \overset{K}{MEM} \overset{1}{\uparrow} \overset{K}{\omega} \overset{1}{\downarrow} \overset{2}{MST} \overset{3}{\uparrow} \overset{K}{PLB} \overset{3}{\uparrow} (\Delta B_{ST}(t) - B_{CNT} = 0) \overset{K}{\uparrow} WR : \\
MSP, B_{SP}, OFLB. &\overset{K}{\omega} \overset{3}{\downarrow} (\Delta B_P(t) - B_{CNT} = 0) \overset{K}{\uparrow} LBON \overset{4}{\uparrow} WR : LBFM, MEM \overset{K}{\omega} \overset{K}{\uparrow} \\
\downarrow WR : LBFE &\overset{K}{\omega} \overset{2}{\downarrow} \overset{MIP}{MSP} \overset{K}{\uparrow} (\Delta B_{SP}(t) - B_{CNT} = 0) \overset{K}{\uparrow} WR : MST, B_{ST}, \\
B_P, ONLB. &\downarrow S_K,
\end{aligned}$$

де MIP – повідомлення операторові про помилку у програмі, оскільки вираз $\overline{MST} \& \overline{MSP}$ при автоматичному виді управління не може бути дійсним.

Слід зазначити, що розглянутий спосіб може бути використаний при алгоритмізації циклів управління будь-якими іншими технологічними процесами на судні, наприклад, для періодичного виклику програми розподілу активних навантажень між паралельно працюючими ГА.

Перейдемо до розв'язання завдань алгоритмізації управління процесами пуску й зупинки ДГ. У якості вихідної схеми, що характеризує набір функціонально необхідних периферійних елементів системи для управління процесами пуску й зупинки, приймемо схему, показану на рис. 5.4,

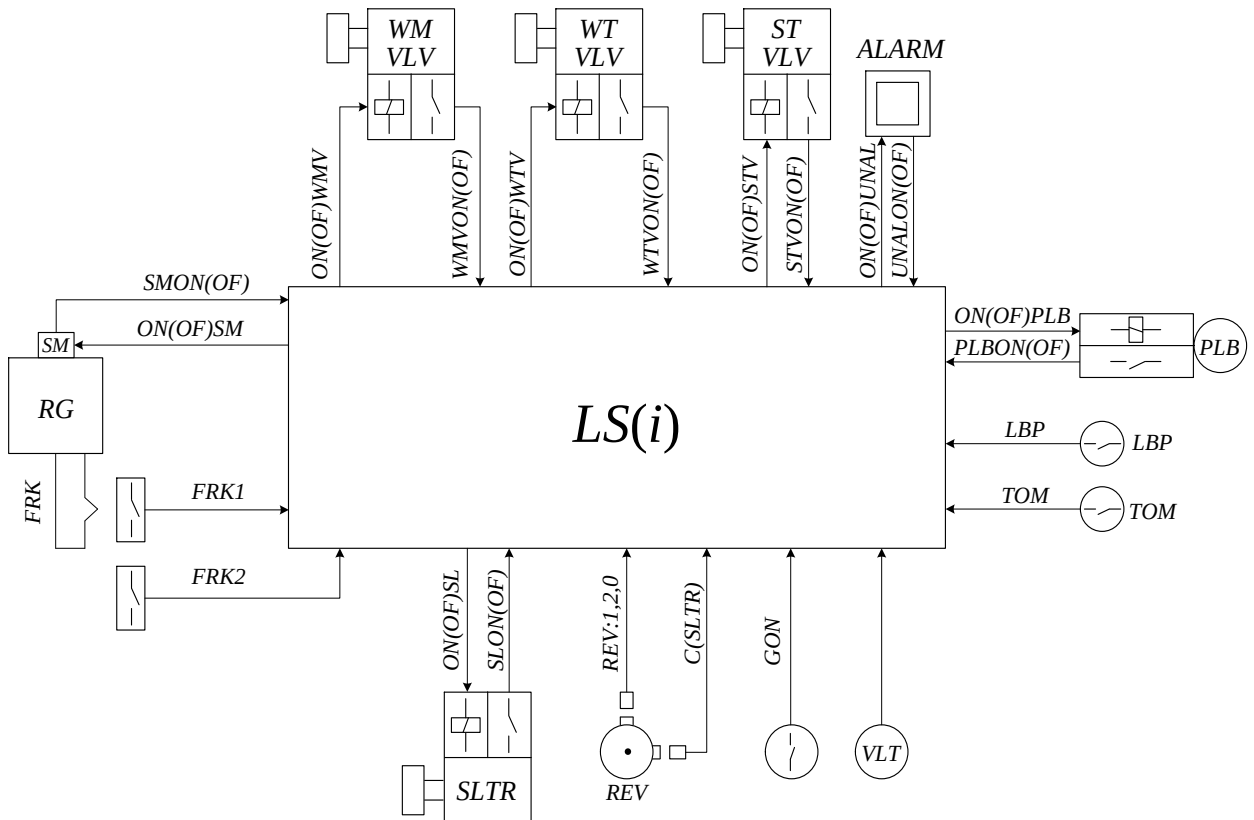


Рис. 5.4. Зв'язок локальної підсистеми і об'єктів управління

де *WMVLV*, *WTVLV*, *STVLV*, *SLTR* – електромагнітні клапани управління підігрівом охолоджуючої води, пускового повітря й повільного провертання дизелю, відповідно, *PLB* – електродвигун насоса мастилопрокачування; *LBP*, *TOM*, *VLT*, *GON*, *REV*, *C(SLTR)* – датчики тиску мастилопрокачування, мінімальної температури мастила, напруги, стану генераторного вимикача, обертів і числа повільних провертань валу; *FRK*, *RG*, *SM* – паливна рейка, регулятор, серводвигун регулятора; *ALARM*, *UNAL* – аларм і блокування аларма.

Будемо вважати, що локальна підсистема *LS(i)* повинна не тільки посылати команди *ON/OFF* ~ на включення/відключення виконавчого органу (~), але й контролювати його стан ~ *ON/OFF* – включене/виключене, шляхом обробки сигналів, що надходять від допоміжних контактів контактора.

Таким чином, предикат *ONSTV* будемо вважати дійсним, якщо є команда "Включити пусковий клапан", а предикат *STVON = I*, якщо контактор, що подає живлення на електромагнітний клапан, спрацював.

Супервізор локальної підсистеми звертається до програми *PRST* пуску при переході *LS(i,1) → LS(i,2)*, рис. 5.2, якщо є команда *MST* на пуск ДГ. З метою підвищення функціональної надійності ПЗ доцільно передбачити у програмі *PRST* повторну (після супервізора) перевірку стану об'єкта управління. Вихідний стан повинний описуватися наступним словом

$$SIGNLS(i,2.0) = \overline{GON} \& \overline{REV2} \& \overline{REV1} \& \overline{TOM} \& \overline{FRK1},$$

тобто предикати, що характеризують цей стан генераторного автомата, другої і першої уставок обертів, мінімальної температури мастила й першого положення рейки паливних насосів, повинні бути невірними. У цьому випадку виконання програми *PRST* повинне починатися з установки *FRK* на пускову оцінку шляхом включення *ONSM1* серводвигуна регулятора. Час роботи серводвигуна повинен бути обмежений відрізком *B(SM1)*, протягом якого програма повинна контролювати роботу сервомотора й положення рейки. Цей стан позначимо *LS(i,2.1)*, а його ознаку виразимо словом

$$SIGNLS(i,2.1) = SMON \& \overline{FRK1} \& \overline{TMSM1},$$

де $TMSM1$ – предикат, дійсний після закінчення часу $B(SM1)$.

У такому випадку інструкцію переходу системи від стану $LS(i,2.0)$ до стану $LS(i,2.1)$ запишемо у вигляді наступного правила:

if $SINGLS(i,2.0)$ *then do*: $ONSM1, WR: B(SM1), LS(i,2.1)$ *od fi*

Отже, у наступному $t + 1$ технологічному циклі програма $PRST$ повинна почати роботу з нової $LS(i,2.1)$ області, що виразимо у вигляді інструкції:

while $SBLs(i,2.1)$ *do*: *if* $SIGNLS(i,2.1)$ *then* S_K *else*
if $SMON \& FRK1$ *do*: $OFSM, OFWMV, ONWTV, ONPLB, ONSLTR,$
 $WR: C(SLTR4), B(PLB), LS(i,2.3)$ *else do*: $WR: EM$ *od fi*,

тобто, якщо ознака $LS(i,2.1)$ зберігається у новому такті, то ніяких дій не вживається, якщо ж ознаки $LS(i,2.1)$ немає, і при цьому паливна рейка досягла першої уставки $FRK1$, то виконуються дії: відключення серводвигуна, відключення клапана підігріву, включення клапана охолоджуючої води, мастилопрокачки й повільного повертання; записується: число $C(SLTR4)$, що визначає кількість обертів у повільному повертанні, час контролю вдалої мастилопрокачки й новий стан $LS(i,2.3)$. При невдалій установці рейки у положення FRK реєструється аварія.

Тепер формалізуємо за допомогою табл. 5.1 функціонування алгоритму $PRST$ на нульовій $SBLs(i,2.0)$ області з обліком усіх можливих відхилень від слова ознаки $SIGNLS(i,2.0)$. Перше відхилення $LS(i,2.0.1)$ пов'язане з тим, що ДГ за температурою мастила $TOM = I$ готовий до приймання навантаження, тому програма включить серводвигун у роботу так, щоб рейка встановлювалася у положення $FRK2$.

Контроль над цим здійснюється у гілці $LS(i,2.2)$. У момент, коли $FRK2$ стане дійсним, програма повинна перейти до виконання операцій пуску аналогічно варіанту $LS(i,2.0.2)$, тобто підпрограми $SBLs(i,2.2)$, $SBLs(i,2.1)$, $SBLs(i,2.0.2)$ за своїм результатом повинні бути ідентичними. У всіх випадках вони закінчуються реєстрацією чергової $LS(i,2.3)$ гілки алгоритму.

Таблиця 5.1 - Функціонування алгоритму *PRST* на нульовій області з обліком усіх можливих відхилень

Послідовність перевірок слова-ознаки	Стани предикатів								Результат виконання алгоритму
	<i>GON</i>	<i>REV2</i>	<i>REV1</i>	<i>UNALON</i>	<i>VLT</i>	<i>FRK1</i>	<i>FRK2</i>	<i>TOM</i>	
<i>LS(i,2.0.0)</i>	0	0	0	–	–	0	–	0	<i>ONSM1</i> ; <i>WR: SM1</i> ; S_K
<i>LS(i,2.0.1)</i>	0	0	0	–	–	0	0	1	<i>ONSM2</i> ; <i>WR: B(SM2), LS(i,2.2)</i> ; S_K
<i>LS(i,2.0.2)</i>	0	0	0	–	–	1	0	0	<i>OFWMV</i> ; <i>ONWTV</i> ; <i>ONPLB</i> ; <i>ONSLTR</i> ; <i>WR: C(SLTR4); B(PLB); LS(i,2.3)</i> ; S_K
<i>LS(i,2.0.3)</i>	0	0	1	–	–	–	1	–	<i>ONTMCNT</i> ; <i>OFPLB</i> ; <i>OFSTV</i> ; <i>WR: B(UNAL), B(REV2); LS(i,3.3)</i> ; S_K
<i>LS(i,2.0.4)</i>	0	0	1	–	–	–	0	–	<i>WR: B(TOM), LS(i,3.1)</i> ; S_K
<i>LS(i,2.0.5)</i>	0	1	–	1	1	–	–	–	<i>WR: LS(i,4.1)</i> ; S_K
<i>LS(i,2.0.6)</i>	0	1	–	1	0	–	–	–	<i>WR: MEM</i> ; S_K
<i>LS(i,2.0.7)</i>	0	1	–	0	–	–	–	–	<i>WR: B(UNAL), LS(i,3.4)</i> ; S_K
<i>LS(i,2.0.8)</i>	1	–	–	–	–	–	–	–	<i>JPRCLS</i>

Якщо у результаті перевірки слова-ознаки *SBLs(i,2.0.3)* виявиться, що ДГ уже запущений $REV1=I$, і рейка перебуває у положенні *FRK2*, але $REV2 \neq I$, то програма повинна зареєструвати третій стан *LS(i,3)* системи, рис. 5.2, записати час розгону *B(REV2)* дизеля й контролювати розгін на гілці *LS(i,3.3)*. Якщо ж $FRK2 \neq I$, то реєструється перша гілка *LS(i,3.1)* третього стану, на якій програма повинна включити *ONSM2* серводвигун регулятора. Якщо при перевірці слова-ознаки стану виявиться, що ДГ має номінальні оберти $REV2=I$ й напругу $VLT = I$ при знятому блокуванні аварій $UNAL = I$, то програма повинна зареєструвати четвертий стан *LS(i,4)* – “Двигун готовий до приймання навантаження”. Якщо блокування аварій не зняте, то реєструється остання гілка третього стану *LS(i,3.4)*, на якій повинен проводитися контроль витікання часової затримки *TMUNAL* включення захистів від аварії за тиском мастила.

Для остаточного розв'язання завдання по встановленню властивостей алгоритму обробки другого *LS(i,2)* стану введемо додатково до названих вище гілок ще три – *LS(i,2.4)*, *LS(i,2.5)* і *LS(i,2.6)* гілки. При цьому накажемо їхньому функціонуванню наступні результатні функції, задані у вигляді послідовностей таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Функціонування алгоритму обробки трьох гілок
 $LS(i,2.4)$, $LS(i,2.5)$ і $LS(i,2.6)$ другого $LS(i,2)$ стану

Послідов- ність уста- новлення слова- ознаки	Стани предикатів											Результат виконання алгоритму
	$PLBON$	LBP	$SLTROF$	$TMLB$	$STVON$	$REV1$	$FRK2$	$TMSTVON$	$TMST$	$STVOF$	$TMSTVOF$	
$LS(i,2.4.1)$	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	$WR: C(ST), B(STVON), LS(i,2.5), ONSTV; S_K$
$LS(i,2.4.2)$	–	–	0	–	–	–	–	–	–	–	–	$WR: MEM; S_K$
$LS(i,2.4.3)$	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
$LS(i,2.4.4)$	1	0	–	1	–	–	–	–	–	–	–	
$LS(i,2.4.5)$	1	0	–	0	–	–	–	–	–	–	–	S_K
$LS(i,2.5.1)$	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	$WR: MEM; S_K$
$LS(i,2.5.2)$	–	–	–	–	0	–	–	–	–	–	–	
$LS(i,2.5.3)$	1	–	–	–	1	1	1	–	–	–	–	$WR: B(UNAL), B(REV2), LS(i,3.3), ONTMCNT; OFLB; OFSTV; S_K$
$LS(i,2.5.4)$	1	–	–	–	1	1	0	–	–	–	–	$ONTMCNT; WR: B(UNAL), B(TOM), LS(i,3.1); S_K$
$LS(i,2.5.5)$	1	–	–	–	1	0	–	1	0	–	–	$OFSTV; WR: B(STVOF), LS(i,2.6); S_K$
$LS(i,2.5.6)$	1	–	–	–	1	0	–	0	–	–	–	S_K
$LS(i,2.5.7)$	1	–	–	–	1	0	–	1	1	–	–	$WR: MEM$
$LS(i,2.6.1)$	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
$LS(i,2.6.2)$	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	–	
$LS(i,2.6.3)$	1	–	–	–	–	–	–	–	–	1	0	S_K
$LS(i,2.6.4)$	1	–	–	–	–	–	–	–	–	1	1	$ONSTV; WR: B(STVON), LS(i,2.5); S_K$

З таблиці 5.2 випливає, що виконання алгоритму на гілці $LS(i,2.4)$ може закінчитися одним з трьох варіантів.

Перший, якщо процес мастилопрокачування вдався, полягає у реєстрації числа (C) спроб пуску, формуванні команди на включення пускового клапану, запису числа B , що визначає припустимий час відкритого стану пускового клапану й реєстрації нової гілки.

Другий полягає у реєстрації аварії, якщо з якоїсь причини не ввімкнулися насос мастилопрокачування або клапан повільного провертання, або насос включений, але тиск після закінчення заданого часу недостатній.

Третій, якщо насос включений, тиску немає, але час ще не минув, залишається без зміни.

Інші гілки алгоритму призначені для управління клапаном пускового повітря й контролю спроб пуску. З урахуванням викладеного алгоритм програми пуску $PRST$ синтезуємо у вигляді наступної ЛСА:

$S_{II} \text{ SIGNLS}(2.0) \overset{1}{\uparrow} GON \overset{2}{\uparrow} JPRCLS \overset{K \ 2}{\omega \uparrow \downarrow} REV2 \overset{3}{\uparrow} UNALON \overset{4}{\uparrow} VLT \overset{EM}{\uparrow} WR :$
 $LS(4.1) \overset{K \ 3}{\omega \uparrow \downarrow} REV1 \overset{5}{\uparrow} \overset{6 \ 5}{\omega \uparrow \downarrow} TOM \overset{7}{\uparrow} FRK1 \overset{8 \ 10}{\uparrow \downarrow} OFWMV.ONWTV.ONPLB.$
 $ONSLTR.WR : \{C(SLTR4), B(PLB), LS(2.3)\} \overset{K \ 8}{\omega \uparrow \downarrow} ONSM1.WR : \{B(SM1),$
 $LS(2.1) \overset{K \ 7}{\omega \uparrow \downarrow} FRK2 \overset{9}{\uparrow} \overset{10 \ 9}{\omega \uparrow \downarrow} ONSM2.WRB(SM2).WRLS(2.2) \overset{K \ 1}{\omega \uparrow \downarrow} SIGNLS(2.1) \overset{11}{\uparrow}$
 $FRK1 \overset{12}{\uparrow} SMON \overset{EM}{\uparrow} OFSM. \overset{10 \ 12}{\omega \uparrow \downarrow} TMSM1 \overset{K}{\uparrow} \overset{EM \ 11}{\omega \uparrow \downarrow} SIGNLS(2.2) \overset{13}{\uparrow} SMON \overset{EM}{\uparrow}$
 $FRK2 \overset{14}{\uparrow} OFSM. \overset{10 \ 14}{\omega \uparrow \downarrow} TMSM2 \overset{K}{\uparrow} \overset{EM \ 13}{\omega \uparrow \downarrow} SIGNLS(2.3) \overset{15}{\uparrow} WMVOF \overset{EM}{\uparrow} WTVON \overset{EM}{\uparrow}$
 $SMOF \overset{EM}{\uparrow} PLBON \overset{EM}{\uparrow} SLTRON \overset{EM}{\uparrow} TMC(SLTR4) \overset{16}{\uparrow} OFSLTR.TMLB \overset{17}{\uparrow} \overset{K}{\omega \uparrow}$
 $\overset{17}{\downarrow} WRLS(2.4) \overset{K \ 16}{\omega \uparrow \downarrow} TMLB \overset{K}{\uparrow} \overset{EM \ 15}{\omega \uparrow \downarrow} SIGNLS(2.4) \overset{18}{\uparrow} PLBON \overset{EM}{\uparrow} LBP \overset{19}{\uparrow} SLTROF \overset{EM}{\uparrow}$
 $\overset{25}{\downarrow} WRC(ST) \overset{K \ 19}{\omega \uparrow \downarrow} TMLB \overset{K}{\uparrow} \overset{EM \ 18}{\omega \uparrow \downarrow}$
 $SIGNLS(2.5) \overset{20}{\uparrow} PLBON \overset{EM}{\uparrow} STVON \overset{EM}{\uparrow} REV1 \overset{21 \ 6}{\uparrow \downarrow} ONTMCNT.OFLB.OFSTV.$
 $WRB(UNAL).FRK2 \overset{22}{\uparrow} WR : \{B(REV2), LS(3.3)\} \overset{K \ 22}{\omega \uparrow \downarrow} WR : \{B(TOM), LS(3.1)\} \overset{K}{\omega \uparrow}$
 $\overset{21}{\downarrow} TMSTVON \overset{K}{\uparrow} OFSTV.TMST \overset{23}{\uparrow} \overset{EM \ 23}{\omega \uparrow \downarrow} WRB(STVOF).WRLS2.6 \overset{EM}{\omega \uparrow}$
 $\overset{20}{\downarrow} SIGNLS(2.6) \overset{24}{\uparrow} PLBON \overset{EM}{\uparrow} STVOF \overset{EM}{\uparrow} TMSTVOF \overset{K \ 25 \ 24}{\omega \uparrow \downarrow} SIGNLS(3.1) \overset{26}{\uparrow}$
 $STVOF \overset{EM}{\uparrow} LBOF \overset{EM}{\uparrow} REV1 \overset{EM}{\uparrow} TOM \overset{27}{\uparrow} ONSM1.WRB(REV2).WRLS(3.2)$
 $\overset{29}{\downarrow} UNALON \overset{28}{\uparrow} \overset{K \ 28}{\omega \uparrow \downarrow} TMUNAL \overset{K}{\uparrow} ONUNAL. \overset{K \ 27}{\omega \uparrow \downarrow} TMTOL \overset{29}{\uparrow} \overset{EM \ 26}{\omega \uparrow \downarrow}$
 $SIGNLS(3.2) \overset{30}{\uparrow} SMON \overset{EM}{\uparrow} REV1 \overset{EM}{\uparrow} FRK1 \overset{31}{\uparrow} OFSM.TMREV2 \overset{32}{\uparrow} \overset{EM \ 32}{\omega \uparrow \downarrow}$
 $WRLS(3.3) \overset{29 \ 31}{\omega \uparrow \downarrow} TMREV2 \overset{29}{\uparrow} \overset{EM \ 30}{\omega \uparrow \downarrow} SIGNLS(3.3) \overset{33}{\uparrow} LBOF \overset{EM}{\uparrow} SMON \overset{EM}{\uparrow}$
 $STVOF \overset{EM}{\uparrow} REV1 \overset{EM}{\uparrow} REV2 \overset{34}{\uparrow} UNALON \overset{35}{\uparrow} \overset{36 \ 34}{\omega \uparrow \downarrow} TMREV2 \overset{29}{\uparrow} \overset{EM \ 33}{\omega \uparrow \downarrow}$
 $SIGNLS(3.4) \overset{37}{\uparrow} REV2 \overset{EM \ 35}{\uparrow} \overset{38}{\downarrow} TMUNAL \overset{36}{\uparrow} ONUNAL \overset{EM}{\downarrow} VLT \overset{EM}{\uparrow} WR : LS(4.1) \overset{K}{\omega \uparrow}$
 $\overset{4}{\downarrow} WRB(UNAL) \overset{38}{\downarrow} WRLS(3.4) \overset{K \ 37}{\omega \uparrow \downarrow} SIGNLS(4.1) \overset{CLS}{\uparrow} REV2 \overset{EM}{\uparrow} VLT \overset{EM}{\uparrow}$
 $UNALON \overset{EM}{\uparrow} \overset{K \ EM}{\omega \uparrow \downarrow} WR : MEM \overset{K}{\downarrow} S_K$

де у порядку скорочення опущено запис індексу i у позначеннях $LS(i,...)$.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі, на прикладі автоматизованої СЕЕС, проказана процедура синтезу процесів управління нижнього ієрархічного рівня розподіленої МП-системи.

1. Проведено аналіз типових структур розподілених систем управління СТС і К. Запропоновано використати організацію структури ПЗ у відповідності до принципу "лабілізації" опису і модульності окремих елементів ПЗ. Доведено, що такий опис додає системі гнучкість у процесі налагодження й експлуатації, дозволяє без особливих витрат здійснювати корекцію або розширення функцій управління, розміщати незалежно окремі модулі у пам'яті МП-систем управління.

2. Наведена структура системи управління m -агрегатною САЕЕС і показані особливості синтезу алгоритмів ПЗ супервізора локальних підсистем управління, визначені графи станів дизель-генераторної локальної підсистеми управління і валогенераторної підсистеми.

3. На прикладі управління режимами роботи дизель-генераторних агрегатів у розподілених МП-системах управління СТС і К (за аналогією управлінням m -агрегатних САЕЕС) визначені процеси оптимізації пуску та зупинки окремих агрегатів.

4. Доведено, що запропоновані структури можуть бути ефективно використані при алгоритмізації циклів управління будь-якими іншими складними технологічними процесами на судні, наприклад, для періодичного виклику програми розподілу активних навантажень між паралельно працюючими генераторними агрегатами.

РОЗДІЛ 6. СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СИНХРОНІЗАЦІЄЮ СУДНОВИХ ГЕНЕРАТОРНИХ АГРЕГАТІВ

6.1. Постановка завдання синхронізації генераторних агрегатів

У судновій електроенергетиці синхронізація ГА ставиться до найбільш складних і відповідальних процесів управління. Відомі фундаментальні роботи і сучасні математичні методи [17, 267-269, 271, 272], що охоплюють дослідження й проектування електроенергетичних систем зі статичною, динамічною і змінною структурами [277-279]. Ці і інші роботи дозволяють розраховувати струми ГА при порушенні умов синхронізації і установити припустимі обмеження. Відзначимо, що невикористано мало уваги приділяється розробці методів абстрактного й структурного синтезу пристроїв автоматичної синхронізації із застосуванням досягнень сучасної електроніки і синтезу алгоритмічного забезпечення для програмувальних МП-систем. У найкращому випадку, автори, наприклад [67, 250, 267-269, 276-280], приводять опис принципу дії вузлів деяких типових синхронізаторів або алгоритмів у самому загальному вигляді. Виникає завдання аналізу існуючих способів автоматизації процесу синхронізації суднових ГА, визначення і установлення математичних моделей основних перетворювачів, дослідження їх з позиції практичної реалізації у МП-системах управління. Безумовно, що при цьому необхідно прагнути до максимального використання позитивних властивостей сучасної апаратурної і програмувальної логіки за критеріями надійності, точності, швидкодії тощо [1, 2, 10-19].

Залишаються невирішеними завдання оптимізації управління процесом синхронізації у САЕЕС зі ВГ установками. Ми відзначали, що подальший розвиток САЕЕС характеризується розширенням області застосування ВГ шляхом використання їх не тільки у ходових режимах, але й у режимах маневрів, що приводить до утворення складних суднових технологічних структур, які об'єднали пропульсивний комплекс і електроенергетичну систему. Прагнення до задоволення одночасно двом критеріям – надійності і економічності у по-

дібних комплексах пов'язане із частими змінами їх структури за допомогою виконання таких операцій, як пуск, зупинка й синхронізація ДГ до ВГ із обов'язковою участю операторів. Ця обставина викликає необхідність проведення досліджень ергатичних систем управління з урахуванням принципів ергономіки, що відповідає загальній методології формалізації, побудови і розв'язку складних систем та завдань управління, сформульованих у 2 розділі.

При розв'язку завдань оптимального управління САЕЕС найбільш складною [17, 67, 250, 267, 277-279] є задача синтезу законів адаптивного управління процесом синхронізації ВГ із мережею у режимі нерегулярної хита-виці судна. Тому виникає необхідність розв'язку головного завдання даного розділу у двох постановках – детермінованій і стохастичній.

Детермінована постановка завдань управління процесом синхронізації припускає наявність рівномірної зміни параметрів руху синхронизованих об'єктів при їхньому стабільному русі по заданих траєкторіях, тобто коли останні представлені тільки ДГА й навантаження СЕЕС практично не змінюється. Стохастична постановка завдань синхронізації вимагає дослідження траєкторії руху об'єкту синхронізму зі стохастическими флуктуаціями щодо його завдання, викликаними впливом зовнішніх факторів (нерегулярна хита-виця судна або зміна навантаження). Для деталізації завдання побудови МП-системи управління синхронізацією генераторів скористаємося визначеними принципами системного аналізу (див. розд. 1 та 2).

Уведемо термінологію: ГА, яким безпосередньо управляють у процесі синхронізації, назвемо синхронизованим об'єктом S_Y ; під об'єктом синхронізму O_S розуміємо одиночний або еквівалентний генератор, група параметрів якого у процесі синхронізації задає траєкторію руху синхронизованим об'єктам.

Безліч елементів S , що утворюють автоматизований технологічний процес синхронізації, представимо у вигляді об'єднання двох підмножин $S = S_Y \cup S_{ТП}$, де S_Y – елементи системи управління, $S_{ТП}$ – елементи технологічного процесу синхронізації. Відобразимо їх у вигляді наступних упорядкованих безлічей:

$$S_{\text{П}} \subset S_{\text{OS}}(N_l) \times S_{\text{SY}}(N_m); S_{\text{OS}}(N_l) = \bigcup_{j=1}^{|N_l|} S_{\text{OS}}(j), |N_l| = 2^l - 1;$$

$$S_{\text{SY}}(N_m) = \bigcup_{i=1}^{|N_m|} S_{\text{SY}}(i), |N_m| = m,$$

де S_{OS} – безліч компонентів (ГА, ВГ), що утворюють об'єкт синхронізму, $S_{\text{SY}}(N_m)$ – безліч компонентів, що утворюють синхронізовані об'єкти; $S_{\text{OS}}(j)$ – j -й склад ГА, підключених до шин і утворюючих у такий спосіб об'єкт синхронізму; $S_{\text{SY}}(i)$ – ГА з i -м порядковим номером, $i \in N_m$, підготовлений до синхронізації; $j \in N_l$, N_l – нумерація складу ГА, що працюють на шини до моменту синхронізації; l – кількість ГА, підключених до шин ГРЩ.

Зіставимо безлічі $S_{\text{OS}}(N_l)$ й $S_{\text{SY}}(N_m)$ безлічам предикатів $STS(N_l)$ і $STS(N_m)$, зв'язавши їх взаємно однозначною відповідністю

$$|S_{\text{OS}}(N_l)| = |STS_{\text{OS}}(N_l)| \text{ и } |S_{\text{SY}}(N_m)| = |STS_{\text{SY}}(N_m)|,$$

причому $STS_{\text{OS}}(j) = I$, якщо до шин підключений j -й склад генераторів, а $STS_{\text{SY}}(i) = I$, якщо i -й ГА готовий до синхронізації [277-280].

Отже, у МПСУ СЕЕУ повинні мати місце перетворювачі PR_{OS} й PR_{SY} такі, що забезпечують перехіди

$$S_{\text{OS}}(N_l) \xrightarrow{PR_{\text{OS}}} STS_{\text{OS}}(N_l) \text{ і } S_{\text{SY}}(N_m) \xrightarrow{PR_{\text{SY}}} STS_{\text{SY}}(N_m).$$

Якщо тепер утворювати декартови добутки безлічей у вигляді

$$CH_{\text{OS}} = STS_{\text{OS}}(N_l) \times S_{\text{GA}}(N_m); CH_{\text{SY}} = STS_{\text{SY}}(N_m) \times S_{\text{GA}}(N_m),$$

то стан синхронізованих об'єктів, залежно від рівня абстрагування, можна описати більш детально, використовуючи для цієї мети інформацію від датчиків елементів $GA(N_m)$. Рівень абстрагування буде визначатися розв'язуваним завданням управління. Формально, завдання представляється як визначення вектору параметрів структури $CHS = (CHS_{\text{OS}}, CHS_{\text{SY}}, STR_{\text{АП}}, STR_{\text{МП}})$. Ця структура характеризує склад пристроїв системи і зв'язки – між ними і вектором способів управління $MC = (MC_1, \dots, MC_K)$. Останній описує алгоритми розв'язку завдань управління, заданих параметрами за-

вдань $PBM = (PBM_1, \dots, PBM_N)$, які забезпечують максимальне значення критерію ефективності $K = (K_1, \dots, K_M)$, тобто:

$$\Pi PK \cong \bigcup_K (CHS, MC, PBM, P, t) \rightarrow \max K.$$

Розв'язок поставленого завдання буде представляти деяку сукупність розв'язків безлічі взаємозалежних підзадач, з яких, дотримуючись робіт [1, 2, 10, 12-14, 16-18, 67, 250] доцільно виділити наступні:

- розробка й обґрунтування алгоритмів обробки вхідної інформації й управління, аналіз їх якісних характеристик;
- вибір МП-комплекту (або визначення властивостей, характеристик і фактичних можливостей вже обраного МП-комплекту) для побудови АСУ ЕЕС чи агрегатного мікропроцесорного комплексу (АМПК);
- визначення характеристик процесів обміну між об'єктом і обчислювачем, розробка відсутніх (або раціональних за рядом критеріїв) пристроїв сполучення (апаратних засобів);
- розробка, налаштування і налагодження програмної частини;
- випробування і перевірка взаємодії всього комплексу апаратних і програмних засобів.

У більшості джерел увага зосереджена, головним чином, або тільки на ПЗ, або тільки на апаратне забезпечення. Але сучасне проектування СТС і К полягає у взаємодії процесів синтезу апаратної і програмної частин. Тому процес розробки ПЗ представимо у вигляді таких взаємозалежних етапів.

1. Формалізація сукупності завдань проектування відповідно до техніко-ергатичних і ергономічних вимог до МП-системи управління СТС і К (на прикладі (САЕЕУ).

2. Синтез вихідної логіко-математичної моделі розроблювальної МП системи, опис сукупності характеристик, функція якості системи й інших.

3. Вибір методів дослідження й аналіз логіко-математичної моделі відповідно до поставленого завдання.

4. Розробка способів розв'язку завдань управління і синтезу системи функціональних алгоритмів (визначення складу, кількості операцій, операндів, констант, часу обчислень, вхідних параметрів, максимальних помилок їх виміру, характеру обміну даними із зовнішніми пристроями).

5. Випробування і налагодження спільної роботи апаратної і програмної частин.

Дотримуючись запропонованої методики й уважаючи, що сукупність завдань управління сформульована, як приклад, приступимося до дослідження питань побудови моделей управління процесами синхронізації ГА.

6.2. Побудова моделі управління процесу синхронізації ГА

6.2.1. Побудова моделей бази даних і конфігурації системи управління

Для опису станів синхронизованих об'єктів, представлених безлічами CHS_{OS} й CHS_{SY} , уведемо безлічі незалежних $X(N_x N_m)$ і залежних $Y(N_y N_m)$ змінних, де N_x і N_y їх нумерації. Цілком закономірно, що кожній змінній $X(j, i)$ повинен відповідати певний датчик $d(j, i)$, а між ними повинен існувати перетворювач $P = \{PR, CHV\}$ такий, що забезпечує

$$d(j, i) \xrightarrow{P(j, i)} X(j, i).$$

Визначимо набір дискретних і аналогових параметрів і відповідних їм перетворювачів [172-174], необхідних для формування безлічі незалежних змінних $X(N_x N_m) = \bigcup X(j, i)$.

Опишемо безліч $X(N_x, N_m)$ і перетворювачі, його формуючі, схемою:

$$\begin{aligned} d(1, i) &\xrightarrow{CNV_{SW}} X(1, i); d(1, i) \in SWG(i); \\ d(2, i) &\xrightarrow{CNV_{\omega}} X(2, i); d(2, i) \cong U(\omega), U(\omega) = k_1 \omega_D; \\ d(3, i) &\xrightarrow{CNV_U} X(3, i); d(3, i) \cong U_B(G), U_B(G) = k_2 I_B; \\ d(4, i) &\xrightarrow{CNV_U} X(4, i); d(4, i) \cong U(i) = U_i \sin(\omega_i t + \theta_i); \\ d(5, i) &\xrightarrow{CNV_{\omega}} X(5, i); d(5, i) \cong U(i) = U_i \sin(\omega_i t + \theta_i); \\ d(6, i) &\xrightarrow{PR_{\theta}} X(6, i); d(6, i) \cong U(i) = U_i \sin(\omega_i t + \theta_i); \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned}
d(7,i) &\xrightarrow{CNV_I} X(7,i); d(7,i) \cong I(i) = I_i \sin(\omega_i t + \theta_i - \varphi_i); \\
d(8,i) &\xrightarrow{PR_\varphi} X(8,i); d(8,i) \cong I(i) = I_i \sin(\omega_i t + \theta_i - \varphi_i); \\
d(9,i) &\xrightarrow{PR_\delta} X(9,i); d(9,i) \cong \delta(i) = \omega_i t + \omega_c + \delta_0,
\end{aligned}$$

де $X(1,i)$, $X(2,i)$ і $X(3,i)$ – предикати, причому такі, що: $X(1,i) = I$, якщо i -й ГА підключений до шин ГРЩ; $X(2,i) = I$, якщо i -й ГА вийшов на номінальні оберти, тобто $\omega_i = \omega_n$; $X(3,i) = I$, якщо i -й ГА збуджений, тобто $U_B(G) = U_H$; $X(4,i)$, $X(5,i)$, $X(6,i)$, $X(7,i)$, $X(8,i)$, $X(9,i)$ – результати перетворень апаратним способом CNV або програмним PR , представлені у вигляді цифрових кодів (ω_c – синхронна частота, δ_0 – початковий кут зрушення). Ці коди відображають, відповідно: амплітудні значення лінійних напруг $X(4,i)$, частоту $X(5,i)$, кут зрушення між лінійними напругами $X(6,i)$, амплітудні значення фазних струмів $X(7,i)$, фазовий кут навантаження $X(8,i)$ й кут, що характеризує зсув ротору i -го ГА щодо синхронної вісі $X(9,i)$, без обліку асиметрії до моменту синхронізації [17, 267, 268].

Отриманої безлічі незалежних змінних недостатньо для повного опису станів синхронізованого об'єкта синхронізації. Мова йде про такі характеристики, як різниця напруг, частота ковзання, величина різниці кутів зсуву роторів щодо синхронної вісі, зрівняльного струму, тривалості процесу синхронізації. Одержати їх можемо шляхом перетворення CNV на безлічах $X(N_x, N_m)$ и $X(N_x N_l)$:

$$\begin{aligned}
&\cup_{OS} (X(1,1), \dots, X(1,m), P_{OS}, t \rightarrow STS_{OS}(j); \\
&\cup_{SY} (X(1,i), X(2,i), X(3,i), P_{SY}, t \cong (X(1,i) \& X(2,i) \& X(3,i)) \rightarrow STS_{SY}(i) \\
&\cup_{\Delta U} (X(4,i), X(4,j), P_1, t) \xrightarrow{P_1} Y(1,i); Y(1,i) \cong \Delta U(i); \\
&\cup_{TS} (X(5,i), X(5,j), P_2, t) \xrightarrow{P_2} Y(2,i); Y(2,i) \cong T_S(i); \\
&\cup_{\alpha} (X(9,i), X(9,j), P_3, t) \xrightarrow{P_3} Y(3,i); Y(3,i) \cong \alpha(i); \\
&\cup_{\Delta I_y} (X(7,i), X(7,j), P_4, t) \xrightarrow{P_4} Y(4,i); Y(4,i) \cong \Delta I_y(i); \\
&\cup_{TSY} (CNT(SY), P_5, \tau_c, t) \xrightarrow{P_5} Y(5,i); Y(5,i) \cong T_{SY}; \\
&STS_{OS}(j) \& STS_{SY}(i) \xrightarrow{P_{CNT}} CNT(SY),
\end{aligned} \tag{6.2}$$

де $\cup_{OS}, \cup_{SY}, \cup_{\Delta U}, \cup_{TS}, \cup_{\alpha}, \cup_{\Delta I_y}, \cup_{TSY}$ – результатні функції: P_{OS}, P_{SY}, P_{CNT} , $P_1, \dots, P_5$ – алгоритми перетворювачів, причому P_{OS}, P_{SY} й P_{CNT} – представлені у явному виді, P_2 і P_3 – визначені у П, а інші – P_4 , і P_5 поки у неявному виді; $STS_{OS}(j)$; $STS_{SY}(i)$ і $CNT(SY)$ – предикати, причому такі, що: якщо $STS_{OS}(j) = I$, тоді розглянутий ГА ставиться до об'єкта синхронізму, якщо $STS_{SY}(i) = I$, тоді до синхронизованого об'єкту і якщо $CNT(SY) = I$, тоді лічильник часу процесу у роботі; $Y(1,i), Y(2,i), Y(3,i), Y(4,i), Y(5,i)$ – результати перетворень $P_1, \dots, P_5$, що породжують, відповідно: $Y(1,i)$ – величину різниці напруг $\Delta U(i) = U_i - U_j$; $Y(2,i)$ – величину періоду ковзання $T_S(i) = 1/\omega_S(i)$; $Y(3,i)$ – величину різниці кутів зсуву роторів синхронизованих об'єктів щодо синхронної вісі – $\alpha_i = \delta_i - \delta_j$; $Y(4,i)$ – величину зрівняльного струму при підключенні i -го ГА до об'єкту синхронізму – $\Delta I_y(i)$ і $Y(5,i)$ – поточний час процесу синхронізації T_{SY} (у цифрових кодах).

Очевидно, що для оцінки поточного стану процесу синхронізації ГА необхідно увести ряд граничних (еталонних) значень параметрів цього процесу у виді безлічі констант $K(N_K)$:

$K_1 \cong \Delta U_{\text{доп}}; K_2 \cong 0; K_3 \cong T_{s \min}; K_4 \cong T_{s \max}; K_5 \cong \alpha_{\text{доп}}; K_6 \cong \Delta I_{y \text{ доп}}; K_7 \cong T_{SY \text{ доп}}$, де $\Delta U_{\text{доп}}, 0, T_{s \min}, T_{s \max}, \alpha_{\text{доп}}, \Delta I_{y \text{ доп}}, T_{SY \text{ доп}}$ – припустимі й граничні значення фізичних величин у відносних і абсолютних одиницях, $K_1, \dots, K_7$ – їх цифрові еквіваленти.

Перетворювачам П, що здійснюють оцінку стану процесу синхронізації, поставимо у відповідність наступні результатні функції:

$$\begin{aligned}
 &\cup_{VLT}(Y(1,i), K_1, PR_{VLT}, t) \cong (Y(1,i) \exists K_1 (PR_{VLT}(Y(1,i) K_1)) \rightarrow VLT(i); \\
 &\Delta U \leq \Delta U_{\text{доп}} \\
 &\cup_{SFR}(Y(2,i), K_2, PR_{SFR}, t) \cong \forall Y(2,i) \exists K_2 (PR_{SFR}(Y(2,i) K_2)) \rightarrow SFR(i), \\
 &T_s > 0 \\
 &\cup_{FRQ}(Y(2,i), K_3, K_4, PR_{FRQ}, t) \cong \\
 &\cong \forall Y(2,i) \exists K_3 \exists K_4 (PR_{FRQ}(Y(2,i), K_3, K_4)) \rightarrow FRQ(i)
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

$$\begin{aligned}
& T_{s \min} \leq T_s \leq T_{s \max} \\
& \bigcup_{PHS} (Y(3,i), K_5, PR_{PHS}, t) \cong \forall Y(3,i) \exists K_5 (PR_{PHS}(Y(3,i), K_5)) \rightarrow PHS(i), \\
& \alpha \leq \alpha_{\text{доп}} \\
& \bigcup_{TSY} (Y(5,i), K_7, PR_{TSY}, t) \cong \forall Y(5,i) \exists K_7 (PR_{TSY}(Y(5,i), K_7)) \rightarrow TSY(i) \\
& T_{SY} \leq T_{SY \text{ доп}}
\end{aligned}$$

Таким чином, використання безлічей X –незалежних і Y –залежних змінних, а також виконаний синтез математичних моделей перетворювачів П інформації процесу синхронізації дозволили сформувати безлічі $CHS_{OS} = (X(1,i), \dots, X(9,i), Y(1,i), \dots, Y(5,i))$, $CHS_{SY} = (X(1,i), \dots, X(9,i))$, й набір предикатів $STS_{\Pi} = (VLT(i), SFR(i), FRQ(i), PHS(i), TSY(i))$, що описують стану об'єкта синхронізму, синхронизованого об'єкту і технологічного процесу синхронізації, відповідно. До опису $CHS_{АП}$, $CHS_{МП}$ підійдемо з обліком прийнятої раніше конфігурації дворівневої розподіленої МП АСУ.

Інформацію про стан синхронизованих об'єктів [1, 2, 10, 12-14, 16-18] класифікуємо за трьома ознаками: періодичності у масштабі часу T_{Π} , часовому характеру (аналогова/дискретна) і принципу фіксації (опитувана/реєстрована). У силу властивостей процесу синхронізації, інформацію про його протікання, одержувану від датчиків $d(1,i), \dots, d(9,i)$, класифікуємо як постійну, з періодичністю відновлення не більш T_{Π} (деякі рекомендації до вибору значення T_{Π} приводяться у 6.2.2). За другою ознакою інформацію про синхронизовані об'єкти віднесемо до аналогової середнього рівня (АС): струм навантаження генератора $(d(7,i), (d(8,i))$; напруга генератора $(d(4,i), (d(5,i), (d(6,i))$; струм порушення генератора $(d(3,i))$.

6.2.2. Опис моделей основних перетворювачів з використанням результатних функцій

На першому етапі аналізу використовуємо мову результатних функцій, широко застосовуваний у теорії алгоритмів [110-114, 118], а також [172-174].

Це дає можливість описати ряд перетворювачів, що породжують предикати й залежні змінні, що лежать у основі функціонування системи управління.

Формування предикатів $INC(i)$ и $DCR(i)$, що визначають напрямок припасування [11-17] синхронизованого об'єкта, з урахуванням оцінки стану процесу синхронізації за частотою $\{\omega_{s\min} \leq \omega_s \leq \omega_{s\max}, \omega_s > 0\}$ опишемо так:

$$\bigcup_{INC} (FRQ(i), FRS(i), P_{INC}, t) \cong (\overline{FRS}(i) \vee FRS(i) \& \overline{FRQ}(i)) \rightarrow INC(i)$$

$$\bigcup_{DCR} (FRQ(i), FRS(i), P_{DCR}, t) \cong (\overline{FRQ}(i) \& FRS(i)) \rightarrow DCR(i)$$

де $INC(i)$ и $DCR(i)$ – предикати, причому такі, що $INC(i) = I$, якщо необхідне збільшення обертів, а $DCR(i) = I$, якщо необхідне зменшення обертів i -го ГА; P_{INC} и P_{DCR} – алгоритми перетворювачів, представлені явно у вигляді логічних формул.

Результатну функцію перетворювача, що розраховує тривалість імпульсу припасування $Y_{IMP}(i)$ запишемо у вигляді:

$$Y_{IMP}(Y(2,i), Y_{CR}(i), P_{IMP}, t) \cong Y_{CR}(i) \& Y(2,i) \xrightarrow{CNV} Y_{IMP}(i),$$

де $Y(2,i)$ – цифровий код періоду ковзання, а $Y_{CR}(i) = f_1(s, \tau_3, n_{\text{еиб}})$ – значення функціоналу, що характеризує динамічні властивості ланцюгу припасування [11-17] на момент синхронізації, причому, s – темп зміни частоти обертання; τ_3 – запізнювання каналу управління частотою обертання; $n_{\text{еиб}}$ – вибіг частоти обертання при знятті сигналу управління.

Отримані у такий спосіб предикати $INC(i)$, $DCR(i)$ й залежна змінна $Y(IMP)$ дозволяють визначити функції формування предикатів, що задають керуючі впливи $RTI(i)$ – "Побільшати", $RTD(i)$ – "Зменшити" частоту синхронизованого об'єкту, тобто

$$\bigcup_{RTI} (INC(i), F_{CNV}(Y(IMP), \tau_0, P_{RTI}) \rightarrow RTI(i);$$

$$\bigcup_{RTD} (DCR(i), F_{CNV}(Y(IMP), \tau_0, P_{RTD}) \rightarrow RTD(i)$$

де F_{CNV} – функція контролю часу витікання імпульсу припасування [11-17] з дискретністю τ_0 , а її обчислювальний алгоритм має вигляд:

$$\bigcup_{CNV} (Y(IMP), \tau_0) \cong (\Delta Y(IMP)t - 1(t+1) = 0),$$

причому, t – попередній, $t+1$ – поточні такти технологічних циклів.

Результатну функцію $\cup_{PNT}$, за якою визначається у цифровому виді час очікування точки оптимуму синхронізації – Y_{PNT} за параметрами $X(5, j), X(5, i), Y(3, i)$, запишемо поки у неявному виді:

$$\cup_{PNT} = (X(5, j), X(5, i), Y(3, i), PR_{PNT}) \rightarrow Y_{PNT}.$$

Знаючи Y_{PNT} і задавшись, поки у неявному виді, значенням часу спрацьовування ланцюгу включення генераторного автомата Y_{SW} , функцію породження предиката, що визначає момент випередження $ADV(i)$, запишемо як

$$\cup_{ADV} = (Y_{SW}(i), Y_{PNT}, F_{TST}(Y_{PNT}, Y_{SW}(i), \tau_0, P_{ADV}) \rightarrow ADV(i),$$

де F_{TST} – функція контролю часу очікування з дискретністю τ_0 . Її обчислювальний алгоритм має вигляд:

$$\cup_{TST}(Y_{PNT}, Y_{SW}(i), \tau_0) \cong (\Delta Y(PNT)t - 1(t+1) = 0) \rightarrow SW(i),$$

де $Y_{SW}(i) = f_2(\tau_{AB}, \tau_{p1}, \tau_{p2}, \tau_{yc})$ причому, $\tau_{yc}, \tau_{p1}, \tau_{p2}$ и τ_{AB} – власний час спрацьовування основних елементів каналу включення генераторного автомата, відповідно: системи управління (τ_{yc}), реле гальванічної розв'язки (τ_{p1}), проміжного реле (τ_{p2}) й автоматичного вимикача генератора (τ_{AB}).

Особливості визначення цих параметрів і розрахунки $Y_{SW}(i)$ розкриваються у § 6.3. Таким чином, якщо припустити, що отримано повний набір предикатів $VLT(i), FRS(i), FRQ(i), PHS(i), ADV(i)$, то результатну функцію, що породжує кінцевий предикат процесу $SWG(i)$, запишемо у неявному виді:

$$\begin{aligned} \cup_{SWG}(VLT(i), FRS(i), FRQ(i), PHS(i), ADV(i), P_{SWG}, t) &\cong \\ &\cong (VLT(i) \& FRQ(i) \& FRS(i) \& PHS(i) \& ADV(i)) \rightarrow SWG(i). \end{aligned}$$

Аналіз отриманих результатних функцій показує, що їх можна згрупувати за типом обчислювальної моделі і спростити їх програмування. При такому підході, вектор способів управління процесом синхронізації $MC = (MC_1, MC_2, MC_3, MC_4)$ буде визначений так:

$$MC_1 = (PR_{VLT}, PR_{FRS}, PR_{FRQ}, PR_{PHS}, PR_{TSV});$$

$$MC_2 = (P_{INC}, P_{DCR}, PR_{IMP});$$

$$MC_3 = (P_{PNT}, P_{ADV});$$

$$MC_4 = (P_{RTI}, P_{RTD}, P_{SWG}).$$

Реалізація алгоритмів $PR_{VLT}, PR_{FRQ}, PR_{FRS}, PR_{PHS}$ пов'язана з виконанням арифметичних дій – вирахування й порівняння результату з нульовим кодом. Наприклад, фрагмент, що реалізує алгоритм PR_{VLT} , має вигляд:

lft $z_1 = k_1 - Y_1(i)$

if $z_1 > 0$, *then* 5

let $VLT = 0$

print "Не виконана умова синхронізації за напругою"

let $VLT = 1$.

Алгоритми $P_{INC}, P_{DCR}, P_{ADV}, P_{RTD}$ и P_{SWG} , отримані у вигляді булевих виражень, можуть бути реалізовані як програмно, так і апаратно. Синтез алгоритмів PR_{IMP}, PR_{PNT} пов'язаний з визначенням функціоналів $Y_{IMP}(i) = f_1(T_s, s, \tau_3, n_{\text{выб}})$ і $Y_{SWG} = f_2(\tau_{yc}, \tau_{p1}, \tau_{p2}, \tau_{AB})$, вимагає окремого дослідження. Для цієї мети використовуємо принцип відносного руху об'єктів.

6.2.3. Аналіз елементів системи управління на базі принципу відносного руху об'єктів

Принцип відносного руху сформульований і розвинений у роботах [10, 12-18, 249, 266] і [172-174, 273-275] стосовно до завдань керування надводними об'єктами, що маневрують. Принцип відносного руху об'єктів дозволяє виділити з безлічі CHS підмножини CHS_{OS}^T й CHS_{SY}^T руху, що характеризують траєкторії, об'єкту синхронізму й синхронізованого об'єкта, відповідно. Тепер основні завдання управління процесом синхронізації можна сформулювати як: вивід синхронізованого об'єкта на задану траєкторію руху –

CHS_{OS}^T і визначення моменту збігу траєкторій руху синхронизованого об'єкта – CHS_{SY}^T із заданої CHS_{OS}^T .

З метою вистави CHS_{OS}^T й CHS_{SY}^T у явному виді, виділимо з них групи параметрів $\{X(4, j), X(3, j), X(9, j)\}, \{X(4, i), X(5, i), X(9, i)\}$ і надалі, будемо розглядати їхні фізичні еквіваленти $\{U_{OS}, \omega_{OS}, \delta_{OS}\}$ та $\{U_{SY}, \omega_{SY}, \delta_{SY}\}$, що досить повно характеризують траєкторії руху об'єктів синхронізації.

Розв'язок даних завдань багато у чому визначається закономірностями, закладеними у самій постановці завдання: детермінованій й стохастичній.

Детермінована постановка завдань управління процесом синхронізації припускає наявність рівномірної зміни параметрів руху синхронизованих об'єктів при їхньому стабільному русі по заданих траєкторіях, тобто

$$\frac{d\omega_{SY}}{dt} = const; \quad \frac{d\omega_{OS}}{dt} = const; \quad \frac{d\omega_S}{dt} = const \quad (6.4)$$

або на цифровому рівні

$$\frac{\Delta X(4, i)}{\tau} = const; \quad \frac{\Delta X(4, j)}{\tau} = const; \quad \frac{\Delta Y(5, i)}{\tau} = const.$$

При цьому допущенні завдання виводу синхронизованого об'єкта на задану траєкторію руху $\omega_3 = f(\omega_{OS})$ можна розглядати на математичній моделі. Ця модель містить диференціальні рівняння опису роботи генераторного агрегата GA , регулятора – RG і серводвигуна регулятора GM , як елементів корегування завдання управління за параметром ω_{SY} :

$$\begin{aligned} (T_{GA}p + 1)\omega^* &= k_{GA}l^*; \\ (T_1p^2 + T_2p + 1)l^* &= k_{RG}(T_3p + 1)\omega^*; \\ p\omega_3 &= k_{GM}t_{IMP}, \end{aligned} \quad (6.5)$$

де $\omega^* = \frac{\omega_{SY} - \omega_3}{\omega_3}$ – відносна зміна поточного значення кутової частоти обертання – ω_{SY} у порівнянні із раніше встановленим заданим значенням ω_3 ;

$l^* = \frac{l - l_0}{l_H - l_X}$ – відносна зміна положення муфти регулятора, при цьому l_0 по-

ложення у попередньому стані, l_X – у режимі холостого ходу, l_H – при номінальному навантаженні; $k_{GA}, k_{RG}; k_{GM}$ – коефіцієнти підсилення ГА, регулятора й серводвигуна; T_{GA}, T_1, T_2, T_3 – стали часу ГА й регулятора.

Однак, наведена система рівнянь (6.5) не придатна для розв'язку завдань управління, пов'язаних з визначенням моменту збігу траєкторій синхронизованих об'єктів: характеристики руху синхронизованих об'єктів [17, 268] необхідно розглядати у взаємній залежності, бо зміна у просторі однойменних фаз електромагнітних полів синхронизованих об'єктів, представлених у вигляді векторів, у будь-який момент часу t визначається у полярній системі координат. Тому векторне рівняння руху синхронизованого об'єкта щодо об'єкта синхронізації можна записати у наступному виді:

$$\vec{r}_{SY}^{(k)} = \vec{r}_{OS}^{(k)} + \vec{r}_S^{(k)}, \quad (6.6)$$

де

$$\vec{r}_{SY}^{(k)} \cong |u_{SY}^{(k)}| = U_{SY} \sin \omega_{SY} t^{(k)} \quad (6.7)$$

радіус-вектор, що відображає у просторі положення синхронизованого об'єкта у k -й момент часу;

$$\vec{r}_{OS}^{(k)} \cong |u_{OS}^{(k)}| = U_{OS} \sin \omega_{OS} t^{(k)} \quad (6.8)$$

радіус-вектор, що відображає у просторі положення об'єкта синхронізму у k -й момент часу;

$$\vec{r}_S^{(k)} \cong |u_S^{(k)}| = U_{OS} U_{SY} \sin \frac{\omega_{SO} - \omega_{SY}}{2} t^{(k)} \quad (6.9)$$

вектор, що визначає величину яка обгинає напруги у k -й момент часу.

Гіпотеза рівномірної зміни параметрів руху синхронизованих об'єктів у реальних умовах представляється доцільною тільки протягом певного часу, позначеного як $dist$. Таким чином, даній вимозі повинні задовольняти зміни параметрів руху синхронизованих об'єктів у проміжку між відновленнями інформаційних даних і описують вектор параметрів структури CHS . Тобто наведені вираження слушні у випадку $\tau < dist$, де $\tau \cong T_{\Pi\Omega} = t^{(k)} - t^{(k-1)}$ – період

відновлення інформаційних даних у МП СУ. Очевидно, що період $T_{\text{ТЦ}}$, повинен вибиратися виходячи з умов як техніко-експлуатаційних можливостей (швидкісних характеристик, електромагнітних і електромеханічних сталих часу, інерційних властивостей приводних двигунів і т.д.), так і здатності МП СУ обробити наявний потік інформації з урахуванням адаптації людини-оператора до її сприйняття й швидкості виробітку розв'язків. Час обслуговування (обробки) t залежить від функцій розподілу часу обслуговування $F(t)$ для наявних технічних засобів автоматизації синхронизованого об'єкта й МП СУ у цілому. Знаючи $F(t)$, можна визначити ймовірність неперевищення часом обслуговування t деякого заданого значення $t_{\text{зад}} = T_{\text{ТЦ}} - t_{\text{PR}}$:

$$P(t_{\text{зад}}) = f(F(t)); t \leq t_{\text{зад}},$$

і середній час обслуговування одного циклу $M(t) = \int_0^{\infty} t_{\text{PR}} d(F(t))$, де t_{PR} – час, відведений на роботу з поточною програмою.

Таким чином, організація управління синхронизованими об'єктами у МП-системах повинна передбачати циклічне відновлення з періодом $T_{\text{ТЦ}}$ і обробку інформаційних даних (безпосередньо протягом процесу управління, залежно від його технологічних особливостей і властивостей системи управління) [17, 266-269]. Крім того, детермінована постановка завдань синхронізації приводить до необхідності більш ретельного контролю над параметрами руху синхронизованих об'єктів і, у випадку відхилення їх руху від заданих траєкторій, відповідно до прийнятої гіпотези, вимагає вторинного розв'язку завдання з наступним корегуванням параметрів руху.

Завдання синхронізації у детермінованій постановці найменш складні й найбільш зручні у випадках, коли невисокі зміни частоти.

Пропонований стохастичний підхід до вирішення завдань синхронізації дозволяє досліджувати процес синхронізації при русі об'єкту синхронізму по заданій траєкторії зі стохастичними флуктуаціями щодо його завдання під впливом зовнішніх факторів. Очевидна складність реалізації завдання управ-

ління синхронизованим об'єктом при його русі за непередбаченою траєкторією з випадковими параметрами, наприклад, при несправності приводного двигуна або його органів управління.

Систему рівнянь, що описує рух синхронизованого об'єкта, доповнимо набором стохастичних характеристик завдання управління, тобто

$$\begin{aligned}(T_{GA}p + 1)\omega^* &= k_{GA}l^*; \\ (T_1p^2 + T_2p + 1)l^* &= k_{RG}(T_3p + 1)\omega^*; \\ p\omega_3 &= k_{GM}t_{IMP}; \\ \bar{r}_{SY}^{(k)} &= \bar{r}_{OS}^{(k)} + \bar{r}_S^{(k)}; \\ X\omega_{OS}(t) &= (M\omega_{OS}(t), D\omega_{OS}(t), K\omega_{OS}(\tau)),\end{aligned}\tag{6.10}$$

де $M\omega_{OS}(t)$, $D\omega_{OS}(t)$ і $K\omega_{OS}(\tau)$ – математичне очікування, дисперсія і кореляційна функція випадкової величини $X\omega_{OS}$, що описує зовнішнє збурювання за частотою обертання об'єкту синхронізму.

Отримана у такий спосіб система стохастичних рівнянь дозволяє вирішувати завдання синхронізації з урахуванням характеру зовнішніх збурювань. При цьому хід розв'язку завдань синхронізації, у загальному виді, можна описати наступною схемою алгоритму (ЛСА):

$$S_H A_1 A_2 P_1 \overset{1}{\uparrow} P_3 A_4 A_5 A_8 \overset{3}{\downarrow} A_7 \omega \overset{2}{\uparrow} \overset{1}{\downarrow} A_6 \omega \overset{3}{\uparrow} \overset{2}{\downarrow} S_K \tag{6.11}$$

де S_H і S_K – початковий і кінцевий оператори; A_2 – визначення завдання управління і його стохастичних характеристик; A_3 – визначення глибини прогнозу; A_4 – прогнозування змін параметрів завдання; A_5 – корегування завдання управління; A_6 і A_8 – розв'язки завдання управління у детермінованій і стохастичній постановці; A_7 – вивід команд управління; P_1 – перевірка умови необхідності стохастичного підходу до розв'язку завдань; A_1 – введення даних.

Таким чином, завдання управління процесом синхронізації, з урахуванням закономірностей їх постановки, дозволяють у загальному виді описати вектор $PBM = (PBM_1, PBM_2, PBM_3, PBM_4)$, де PBM_1 і PBM_3 – визначення керуючих дій на GM , що забезпечують вивід синхронизованого об'єкта на задану траєкторію руху у детермінованій і стохастичній постановці, відповід-

но; PBM_2 і PBM_4 – визначення моменту включення SW у детермінованій і стохастичній постановці, відповідно. Конкретний опис вектору PBM можливий при встановлених критеріях оптимізації завдань, що визначають його параметри (див. § 6.2.4).

6.2.4. Критерії оптимізації і дуальне управління процесом синхронізації ГА

Завдання оптимізації зв'яжемо з визначенням такого закону управління, який задовольняв би деякій умові екстремуму, що є показником якості (або показником досяжності поставленої мети) і враховував би вимоги обмеження керуючих впливів, якості електроенергії, а також можливі зміни (у процесі експлуатації) технічних характеристик об'єктів синхронізації. Остання вимога викликає необхідність розгляду розроблювальної системи у класі адаптивних систем керування [281]. Оскільки процес синхронізації [17] є складною й багатокритеріальною задачею, те й її розв'язок доцільно декомпонувати - розглядати незалежно, як розв'язок окремої частини завдання. Для оцінки приватного завдання може бути обрано один критерій, якщо завдання просте й мале за обсягом, і за групою критеріїв, якщо завдання комплексне. При цьому, один із групи критеріїв вибирається у якості основного, а інші є додатковими і в умовах їх взаємного антагонізму можуть мати пріоритетну основу. При розв'язку приватних завдань може бути зроблена зміна основного й додаткового критеріїв або зміна пріоритету й ступеню важливості додаткових критеріїв – залежно від вимог до швидкодії, реальної обстановки, виду запропонованого управління й інших факторів, що впливають на протікання процесу синхронізації. Певні (див. попередній параграф) завдання синхронізації умовно поділимо на завдання швидкодії, тобто завдання виконання управління у найкоротший строк, завдання управління у заданий час і завдання управління у запропонованих умовах. Таким чином, виходячи зі значеннєвого змісту завдань управління, запишемо три види критеріїв оптимальності:

– для завдань швидкодії

$$K = \min_u T, \quad (6.12)$$

де T – час управління; u – параметр управління синхронизованим об'єктом;

– для завдань управління у заданий час

$$K = \min(T_{\text{зад}} - T_{\text{факт}}), \quad (6.13)$$

де $T_{\text{зад}}$ – заданий (пропонований) час необхідного управління, $T_{\text{факт}}$ – фактичний час, витрачене на виконання завдання управління;

– для завдань управління у заданих умовах

$$K = \min|\Delta\P_{\text{доп}} - \Delta\P_{\text{факт}}|, \quad (6.14)$$

де $\Delta\P$ – припустима величина відхилення параметру Π_i від $\Pi_{\text{доп}}$; $\Delta\P_{\text{факт}}$ – фактичне відхилення Π_i від $\Pi_{\text{доп}}$.

Відповідно до розглянутих постановок завдань управління синхронизованими об'єктами (детермінований і стохастичний), уведемо критерії оптимальності, ґрунтуючись на (6.10).

Найменш складним є завдання управління у детермінованій постановці, яке базується на тому, що управління синхронизованими об'єктами (а значить і траєкторії їх руху у просторі) задається відомими функціями часу. Окремий випадок такої постановки допускає, що криві напруги мережі UOS , як об'єкта синхронізму, і генератора USY , як синхронизованого об'єкта, являють собою синусоїдальні функції часу (6.7) і (6.8), відповідно. Тоді критерії оптимальності завдань синхронізації у детермінованій постановці повністю описуються залежностями (6.12), (6.13) і (6.14).

Оскільки у розв'язку завдань точної синхронізації визначальними є умови ($\Pi_{3.1} - \Pi_{3.3}$), тоді для оцінки ефективності управління даним процесом доцільно використовувати вираження (6.1), поклавши у основу визначення $\Delta\P_{\text{доп}}$ і $\Delta\P_{\text{факт}}$ трійки параметрів $D = (\Delta U_{\text{доп}}, \omega_{\text{сдоп}}, \alpha_{\text{доп}})$ і $\Phi = (\Delta U, \omega_s, \alpha)$, відповідно. У цілому, враховуючи, що перевищення кожного з параметрів трійки Φ відповідного допуску із D приводить до виникнення істотного зрівня-

льного струму у процесі синхронізації, поставимо різницю ($\Delta\P_{\text{доп}} - \Delta\P_{\text{факт}}$) у відповідність функціоналу

$$i_{\text{ур}} = \frac{\sqrt{2} K E'_d E''_d \sin \frac{\alpha_0}{2}}{x''_{d1} + x''_{d2} + x_c},$$

де K – коефіцієнт, що враховує аперіодичну складову струму; x''_{d1} і x''_{d2} – індуктивні опори розсіювання по поздовжній осі синхронизованих генераторів; x_c – еквівалентний індуктивний опір елементів мережі, що з'єднує синхронизовані генератори; α_0 – початковий кут зрушення фаз між поздовжніми ЕРС синхронизованих генераторів, тобто між E''_{d1} і E''_{d2} [17, 67, 250, 267-272].

Таким чином, основний критерій оцінки ефективності управління процесом синхронізації буде мати вигляд:

$$K = \min_u i_{\text{ур}}.$$

Процес синхронізації приводить до необхідності аналізу характеристик зовнішніх збурень. У загальному випадку можливі два типи завдань оцінки ефективності дій: перший характеризується ймовірністю того, що у результаті виконаних дій буде досягнутий певний ефект, другий заснований на визначенні середнього значення (математичного очікування) очікуваного ефекту. Застосовувавши отриману систему стохастичних рівнянь до кожного із двох типів завдань оцінки ефективності, одержимо дві наступні групи критеріїв оптимальності.

Для першого типу завдань:

$$K = \min_u (P(t)) \text{ – за швидкодії;}$$

$$K = \min_u (P(T_{\text{зад}} - T_{\text{факт}})) \text{ – за виконанням у заданий час;}$$

$$K = \min_u (P(\Pi_{\text{зад}} - \Pi_{\text{факт}})) \text{ – за виконанням із заданою точністю.}$$

Для другого типу завдань:

$$K = \min_u (M(T)) \text{ – за швидкодії;}$$

$$K = \min_u (M(T_{\text{зад}} - T_{\text{факт}})) \text{ – за виконанням у заданий час;}$$

$$K = \min_u (M(\Delta\Pi_{\text{доп}} - \Delta\Pi_{\text{факт}})) - \text{за виконанням із заданою точністю.}$$

Першу групу критеріїв застосуємо для оцінки якості функціонування системи при стохастичесному підході до визначення моменту часу оптимуму синхронізації.

Другу групу критеріїв застосуємо для оцінки системи при управлінні процесом зрівняння частот синхронизованих об'єктів і визначенні моменту подачі випереджального імпульсу на включення генераторного автомату.

Якщо поставити вимогу, відповідно до якої МП СУ при формуванні управляючих дій повинна ураховувати зміну технічних характеристик об'єктів у процесі їх експлуатації, то дані завдання слід вирішувати на базі класичної теорії дуального управління Фельдбаума [281]. Використав ідеї цієї теорії, синтез алгоритму управління, для частки випадків, під які попадають два останні завдання, зведемо до наступного.

Припустимо, що відома математична модель (або є експериментальні дані), що описує з дискретністю τ зміну величини $X(i,j) \in X(NX_1 - Nm)$ у процесі перекладу – P_X синхронизованого об'єкта зі одного – початкового, у інший – заданий, кінцевий стан, тобто

$$\bigcup_X (X_H, \theta, Z, P_X, \tau) \rightarrow X_3 \quad (6.15)$$

де $\bigcup_X$ – результатна функція, а $X_H(\tau)$ – її значення у момент появи керуючого впливу; $\theta(\tau)$ і $Z(\tau)$ – зміни техніко-експлуатаційних показників синхронизованого об'єкта у процесі експлуатації. При цьому, у процесі реалізації кожного з перекладів типу $X_H \xrightarrow{P_X} X_3$ у будь-який, k -й момент часу СУ відомі запропоноване – $X_k(\tau)$ і фактичне – $X_k^\Phi(\tau)$ значення керованої величини. Додаткова інформація про величину $Z(\tau)$ утримується у векторі спостережень $V_{k-1} = (V_{k-1}, V_{k-2}, \dots, V_H)$ величини $X(\tau)$ у попередні моменти часу у векторі управління $\theta_{k-1} = (\theta_{k-1}, \theta_{k-2}, \dots, \theta_H)$, які реєструються у пам'яті МП-системи і являють собою спостережувану передісторію процесу управління. Тут $V_i = X_i + h_i, i \in \overline{0, k-1}$, де h_i – випадкова погрішність виміру величини X_i з відомою щільністю розподілу ймовірностей $P(h_i)$.

Якщо спостереження за реалізованим перекладом показують, що існує відхилення фактичного $X_k^\Phi(\tau)$ значення керованої величини від запропонованого $-X_k^\Pi(\tau)$, то втрати, внесені системою, можна оцінити питомою функцією втрат $W_k(\tau) = W(X_k^\Phi, X_k^\Pi, \tau)$. Цілком очевидно, що за кінцевий час функціонування МП-системи у процесі перекладу, узагальнена функція втрат буде мати наступний вигляд: $W = \sum_{k=0}^n W(X_k^\Phi, X_k^\Pi, \tau)$.

Таким чином, систему будемо вважати оптимальною, для якої повний ризик R – математичне очікування функції втрат – мінімальний, тобто

$$M\{W\} = \sum_{k=0}^n M\{W_k\} = \sum_{k=0}^n R_k \rightarrow \min R \quad (6.16)$$

Тут R_k – питомий ризик, який визначають як

$$R_k = \int_{\psi(V_{k-1}, \theta_{k-1})} r_k P(V_{k-1}, \theta_{k-1}) d\psi. \quad (6.17)$$

Функціонал r_k у (6.17) – умовний питомий ризик, являє собою математичне очікування питомих втрат W_k при фіксованих значеннях векторів V_{k-1} і θ_{k-1} . Він визначається у вигляді:

$$Z_k = \int_{\psi(Z, \theta_k)} W(X_k^\Phi(\theta_k, Z) X_k^\Pi) P(Z/V_{k-1}, \theta_{k-1}) \Gamma_k d\psi, \quad (6.18)$$

де $\Gamma_k = P(\theta_k/V_{k-1}, \theta_{k-1})$ – умовна щільність розподілу θ_k , називана питомою стратегією управління. У (6.17) і (6.18) символом ψ позначена область інтегрування. Вираження $P(Z/V_{k-1}, \theta_{k-1})$ являє собою апостеріорну щільність розподілу невідомого параметру Z . При заданих апіорних щільностях $P_0(Z)$ і $P(h_i)$ перебувають за формулою Байєса:

$$P(Z/V_{k-1}, \theta_{k-1}) = \frac{P_0(Z) \prod_{i=0}^{k-1} P(V_i/Z, \theta_i) \prod_{i=0}^{k-1} \Gamma_i}{P(V_{k-1}, \theta_{k-1})}. \quad (6.19)$$

Умовна щільність розподілу $P(V_i/Z, \theta_i)$ визначається з обліком (6.15) по відомій щільності розподілу $P(h_i)$. Послідовність функцій при $\delta = \{\Gamma_0, \Gamma_1, \dots, \Gamma_n\}$ є стратегія управління. Залежність ризику R від стратегії δ позначимо R_δ і

будемо вважати оптимальною, якщо вона мінімізує ризик R . Ця стратегія шукається у класі припустимих стратегій Δ . Зі (6.17), (6.18) і (5.19) випливає, що кожний доданок R_k у (6.16) залежить від вибору послідовності $\{\Gamma_0, \Gamma_1, \dots, \Gamma_n\}$.

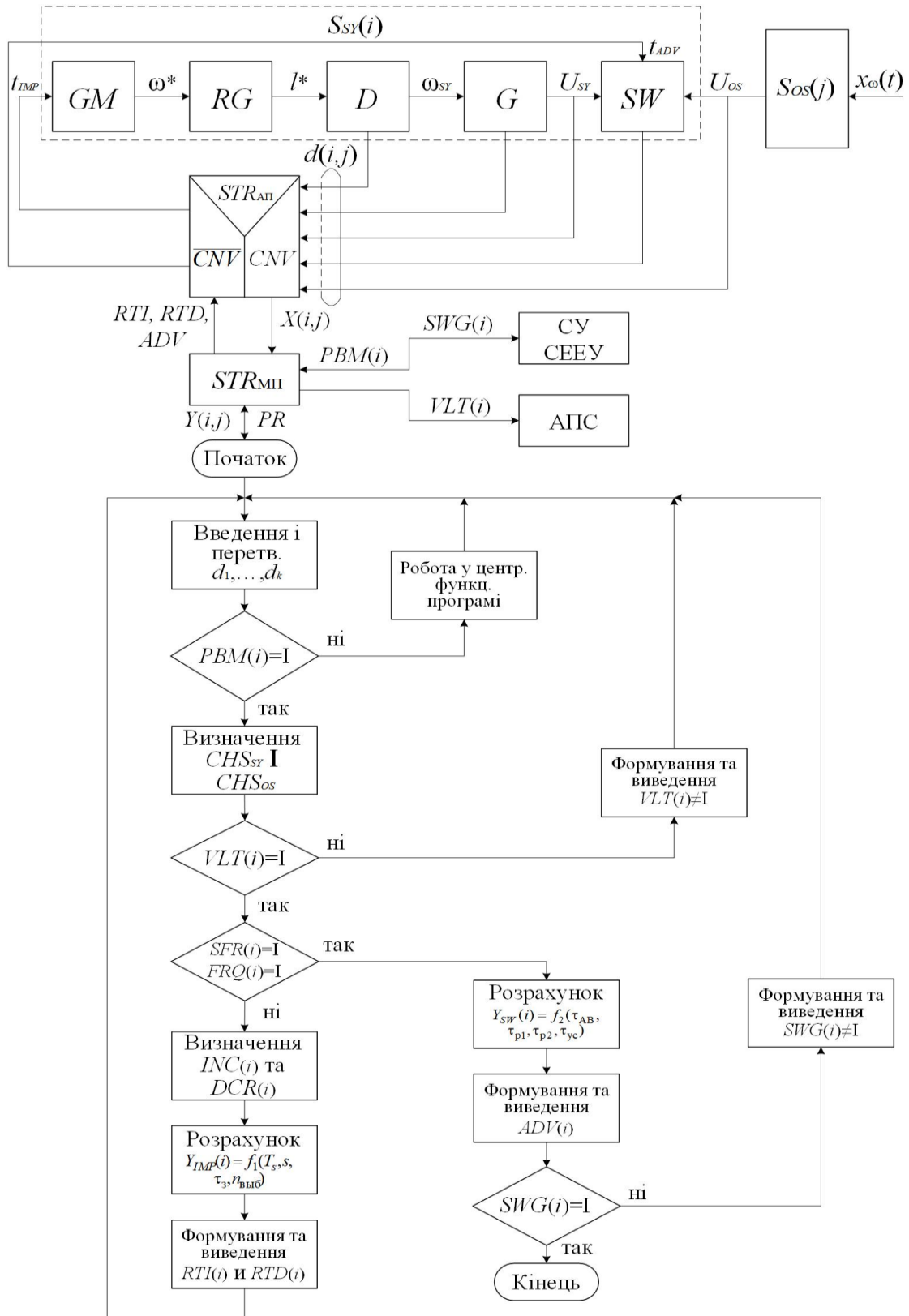


Рис. 6.1. Узагальнена структура управління процесом синхронізації ГА

При цьому вибір питомої стратегії Γ_k впливає не тільки на R_k у k -ий момент часу, але й на значення всіх майбутніх питомих ризиків $R_{k+1}, \dots, R_n$. Цей вплив проявляється, як випливає зі (6.19), через апостеріорну щільність розподілу невідомого параметру й становить сутність дуальності [281] управління: вибір управління визначає не тільки поведінку величини X , але й темп нагромадження інформації про зміну Z .

У зв'язку з викладеним, оптимальна стратегія управління процесом синхронізації, зокрема вирівнювання частот синхронізованих об'єктів і визначення моменту подачі випереджального імпульсу на включення генераторного автомату, пов'язана з розробкою ефективних способів виміру технічних показників об'єктів управління й визначення їх змін у процесі експлуатації.

Якщо отримані результати узагальнити й формалізувати з урахуванням обраної стратегії управління, те структура оптимального управління процесом синхронізації буде мати вигляд, як показане на рис. 6.1.

Практичний розв'язок представлених у такий спосіб завдань управління, відповідно до обраних критеріїв оптимізації, розглянуто у §6.3.

6.3. Практичні способи розв'язку завдань управління синхронізацією

6.3.1. Розв'язок завдання оптимального управління припасуванням частоти синхронізованого об'єкта

У §6.2 отримана у неявному виді результатна функція перетворювача, що розраховує тривалість імпульсу припасування $Y_{IMP}(i)$ [11-17]. Тепер розв'язок поставленого завдання зв'яжемо з визначенням закону управління

$$PR_{IMP} : Y_{IMP}(i) \rightarrow t_{IMP}, \quad (6.20)$$

що дозволяє розрахувати й сформувані такі впливи t_{IMP} , реалізація яких у ланцюзі припасування $GM \rightarrow RG \rightarrow GA$ забезпечить переклад синхронізованого об'єкту на задану траєкторію руху ω_z за мінімальний час регулювання t_p .

У зв'язку із цим виділимо у структурі, наведеної на рис. 6.1, канал управління припасуванням частоти. Представимо його еквівалентною схемою

цифрової АСУ з вихідним сигналом ω_{SY} (див. рис. 6.2). Тут МП система виконує роль дискретного автоматичного пристрою управління [97-99], що працює циклічно, з інтервалом відновлення інформації $\tau = T_{Ц}$.

Детермінована постановка (6.4) і (6.5) дозволяє розглядати пристрій управління, як елемент безперервної дії, закон функціонування якого можна описати математично. У загальному випадку це буде залежність виду

$$t_{IMP} = \frac{\omega^*}{W_{CR}(p)}, \quad (6.21)$$

де $W_{CR}(p)$ – передаточна функція (ПФ) ланцюга припасування; p - оператор Лапласа.

Для структури, що наведена на рис. 6.2, можна записати:

$$W_{CR}(p) = W_{GM}(p) \cdot W_{RG}(p) \cdot W_{GA}(p) = \frac{k_{GM}}{p} \cdot \frac{k_{RG}(T_3p+1)}{T_1p^2 + T_2p + 1} \cdot \frac{k_{GA}}{T_{GA}p + 1};$$

$$W_{CR}(p) = \frac{k_{GM}k_{RG}k_{GA}(T_3p+1)}{T_1T_{GA}p^4 + (T_2T_{GA} + T_1)p^3 + (T_2 + T_{GA})p^2 + p}. \quad (6.22)$$

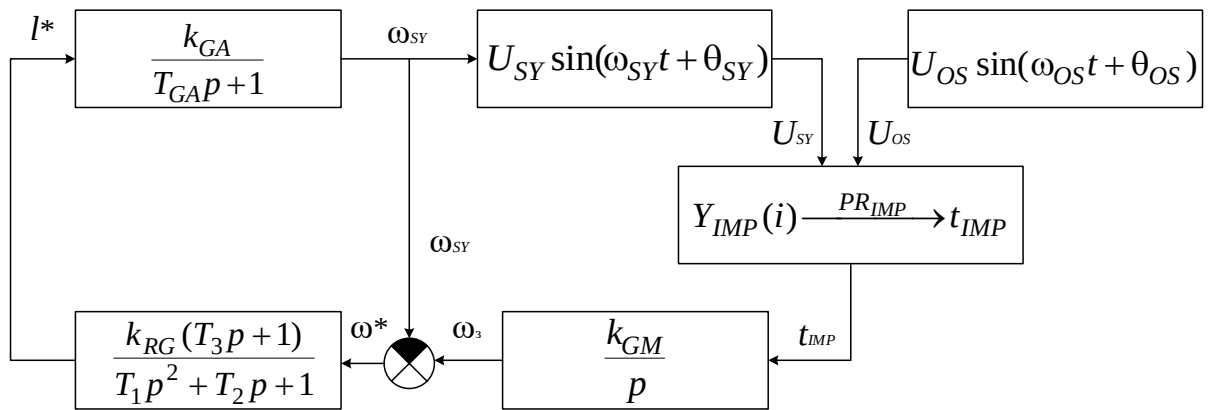


Рис. 6.2. Структурна схема каналу підгонки частоти

Таким чином, вираження

$$\omega^* = \left[\frac{k_{GM} \cdot k_{RG} \cdot k_{GA}(T_3p+1)}{T_1T_{GA}p^4 + (T_2T_{GA} + T_1)p^3 + (T_2 + T_{GA})p^2 + p} \right] t_{IMP} \quad (6.23)$$

буде описувати реальний перехідний процес, викликаний реалізацією у ланцюзі припасування впливу управління t_{IMP} , а зворотна залежність

$$t_{IMP} = \frac{\omega^*}{\left[\frac{k_{GM} \cdot k_{RG} \cdot k_{GA} (T_3 p + 1)}{T_1 T_{GA} p^4 + (T_2 T_{GA} + T_1) p^3 + (T_2 + T_{GA}) p^2 + p} \right]} \quad (6.24)$$

може бути покладеною у основу шуканого управління.

Представлений підхід до визначення t_{IMP} дозволяє враховувати усі можливі у процесі експлуатації СЕЕС зміни параметрів і динамічні властивості, що характеризують ланцюг $GM \rightarrow RG \rightarrow GA$: k_{GM} , k_{RG} , k_{GA} , T_{GA} , T_1 , T_2 , T_3 . Однак, реалізація у МП-системах залежності виду:

$$t_{IMP} = F_1(\omega^*, T_{GA}, T_1, T_2, T_3, k_{RG}, k_{GM}, k_{GA}) \quad (6.25)$$

складна, а найчастіше і неможлива без достовірного визначення параметрів T_{GA} , T_1 , T_2 , T_3 , k_{GM} , k_{RG} , k_{GA} у реальних СЕУ. Із цієї причини $W_{CR}(p)$ опишемо трійкою характеристик $B = (s, \tau_z, n_{виб})$, що дозволяє описати шуканий закон управління залежністю виду

$$t_{IMP} = F_2(\omega_s, \tau_z, s, n_{виб}), \quad (6.26)$$

де s – темп зміни частоти обертання GA , τ_z – запізнювання каналу управління частотою обертання, $n_{виб}$ – вибіг частоти обертання при знятті впливу t_{IMP} .

Представимо модель переходу $\omega_{SY}(H) \xrightarrow{t_{IMP}} \omega_{SY}(K_M)$ у вигляді аперіодичного процесу (див. рис. 6.3, крива НМКМ) і будемо вважати, що відповідна до даної моделі трійка характеристик $B(M) = (s(M), \tau_z(M), n_{виб}(M))$ – визначена. По суті справи, дані величини характеризують перехідний процес у ланцюзі $GM \rightarrow RG \rightarrow GA$, що, по-перше, дозволяє використовувати їх як вихідні дані при синтезі алгоритму оптимального управління припасуванням частоти й, по-друге, при оцінці динамічних властивостей елементів ланцюга.

У зв'язку із цим розв'язок поставленого завдання виконаємо із застосуванням теорії дуального [281] управління, та скористаємося властивостями встановленої відповідності між моделлю переходу $\omega_{SY}(H) \xrightarrow{t_{IMP}} \omega_{SY}(K_M)$ й величинами $s(M)$, $\tau_z(M)$, $n_{виб}(M)$.

$$K_n = \frac{\tau_3(M) \cdot s(M)}{\omega_s(H)} + 1. \quad (6.28)$$

Виконавши підстановку (6.28) у (6.27), одержимо вираження:

$$t_p = \frac{\omega_s(H)}{s(M)} + \tau_3(M), \quad (6.29)$$

що відображає залежність t_p від початкової частоти ковзання $\omega_s(H)$ і динамічних властивостей елементів ланцюгу припасування [10-18], представлених набором $s(M)$, $\tau_3(M)$, $n_{\text{виб}}(M)$. Враховуючи можливість зміни цих величин у процесі експлуатації СЕУ або зміни ω_s через коливання ω_{OS} безпосередньо у процесі регулювання, уведемо у закон (алгоритм) управління припасуванням [11-17] перевірку відповідності, тобто відповідності:

$$\omega_{SY} \left(t_H + \frac{1}{2} t_p \right) \cong \omega_M = \omega_{SY}(H) + \frac{1}{2} \omega_s(H). \quad (6.30)$$

Якщо при цьому $\omega_{SY} = \omega_M$, то переклад $\omega_{SY}(H) \xrightarrow{t_{IMP}} \omega_{SY}(K_M)$ виконується згідно траєкторії, запропонованій трійкою $B(M)$. У тих випадках, коли $\omega_{SY} \neq \omega_M$, наприклад, $\omega_{SY} = \omega_N$ або $\omega_{SY} = \omega_L$, (див. рис. 6.3), необхідна відповідна корекція впливу t_{IMP} , пов'язана з розрахунками t_{IMP}^M згідно формули $t_{IMP}^M = t_{IMP} \pm \Delta t_M$, де знак величини $\Delta t_M = \left| \omega_{SY} \left(t_n + \frac{1}{2} t_p \right) - \omega_M \right| \frac{K_0}{s(M)}$ встановлюється за результатом перевірки будь-якої з умов $\omega_{SY} > \omega_M$ або $\omega_{SY} < \omega_N$.

Істотне значення при цьому має перевірка умови $\omega_{OS}(t_h) = \omega_{OS}(t_m)$, що дозволяє визначити хід подальшого розв'язку поставленого завдання. Так, якщо $\omega_{OS}(t) \neq \omega_{OS}(t_m)$ і зміна $\omega_{OS}(t)$ носить детермінований характер, те необхідні повторні розрахунки t_{IMP} при нових початкових умовах. У випадку стохастичних змін $\omega_{OS}(t)$, закон управління [10-19] припасуванням слід змінити, наприклад, формувати постійний сигнал t_{IMP} до виконання умов:

$$\begin{aligned} \omega_{SY}(t) &= \omega_s(t) + n_{\text{доб}}(M), \text{ якщо } \omega_{SY}(H) > \omega_s(H); \\ \omega_{SY}(t) &= \omega_s(t) - n_{\text{доб}}(M), \text{ якщо } \omega_{SY}(H) < \omega_s(H), \end{aligned} \quad (6.31)$$

де $\omega_3(t) = \omega_{OS}(t) + (\omega_{smax} - \omega_{smin})/2$ – характеризує задану траєкторію припасування [11-18].

Виконання умови $\omega_{OS}(t_h) = \omega_{OS}(t_M)$ свідчить про те, що існуюча розбіжність між фактичним $\omega_{SY}\left(t_H + \frac{1}{2}t_p\right)$ і запропонованим $\omega(M)$ значеннями викликане зміною динамічних властивостей ланцюгу припасування [12-16], що вимагає визначення й корегування величин $s(M)$, $\tau_3(M)$, $n_{виб}(M)$.

Із цієї причини організація адаптивної АСУ, що реалізує запропонований закон припасуванням [11-17] частоти, у першу чергу буде пов'язана з автоматизацією процесу визначення величин s , τ_3 , $n_{виб}$ і перенастроюванням $s(M)$, $\tau_3(M)$, $n_{виб}(M)$ безпосередньо у процесі експлуатації СЕЕУ.

У розв'язку завдання зупинимось на способі визначення величин s і t_p за характеристиками $\Delta f = h_1(t_{IMP})$ і $t_p = h_2(\Delta f)$ (див. рис. 6.4), отриманим шляхом реалізації у ланцюзі $GM \rightarrow RG \rightarrow GA$ набору еталонних значень $t_{IMP}^{\exists} = \{1,2,3,4\}$ із наступною реєстрацією у пам'яті МП-системи початкових і кінцевих значень частоти f_h і f_k і часу t_h і t_k відповідного перехідного процесу.

Отримані у такий спосіб результати реєстрації дозволяють визначити:

$$s(M) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s(i) \text{ та } s(i) = \frac{\Delta f(i)}{t_{IMP}(i)}, \quad (6.32)$$

при формуванні $t_{IMP} \in t_{IMP}^{\exists}$ на збільшення $s(INC)$ і зменшення $s(DCR)$ частоти обертів, а також

$$t_p(i) = t_k(i) - t_h(i), \quad (6.33)$$

де $\Delta f(i) = |f_h(i) - f_k(i)|$ – різниця частот переходу, викликаного реалізацією t_{IMP} , а n – кількість реалізацій.

При такому підході значення $\tau_3(M)$ і $n_{виб}(M)$ можна розрахувати:

$$\tau_3(M) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau(i) \quad (6.34)$$

$$\tau_3(i) = t_p(i) - t_{IMP}(i) \quad (6.35)$$

$$n_{виб}(M) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_{виб}(i) \quad (6.36)$$

$$n_{об}(i) = \Delta f(i) - |f_H(i) - f_{II}(i)| \quad (6.37)$$

де $f_{II}(i)$ – значення, зареєстроване у момент зняття керуючого впливу t_{IMP} .

З обліком викладеного, алгоритм управління ГА при автоматизованому визначенні величин s , τ_3 і $n_{виб}$ зводиться до наступної логічної схеми:

$$S_H \cdot A_1 \downarrow A_2 A_3 P_1 \uparrow A_4 \omega \downarrow A_5 \downarrow A_6 P_2 \uparrow A_7 \downarrow A_8 A_9 P_3 \uparrow A_{10} A_{11} A_{12} P_4 \uparrow A_{13} S_K. \quad (6.38)$$

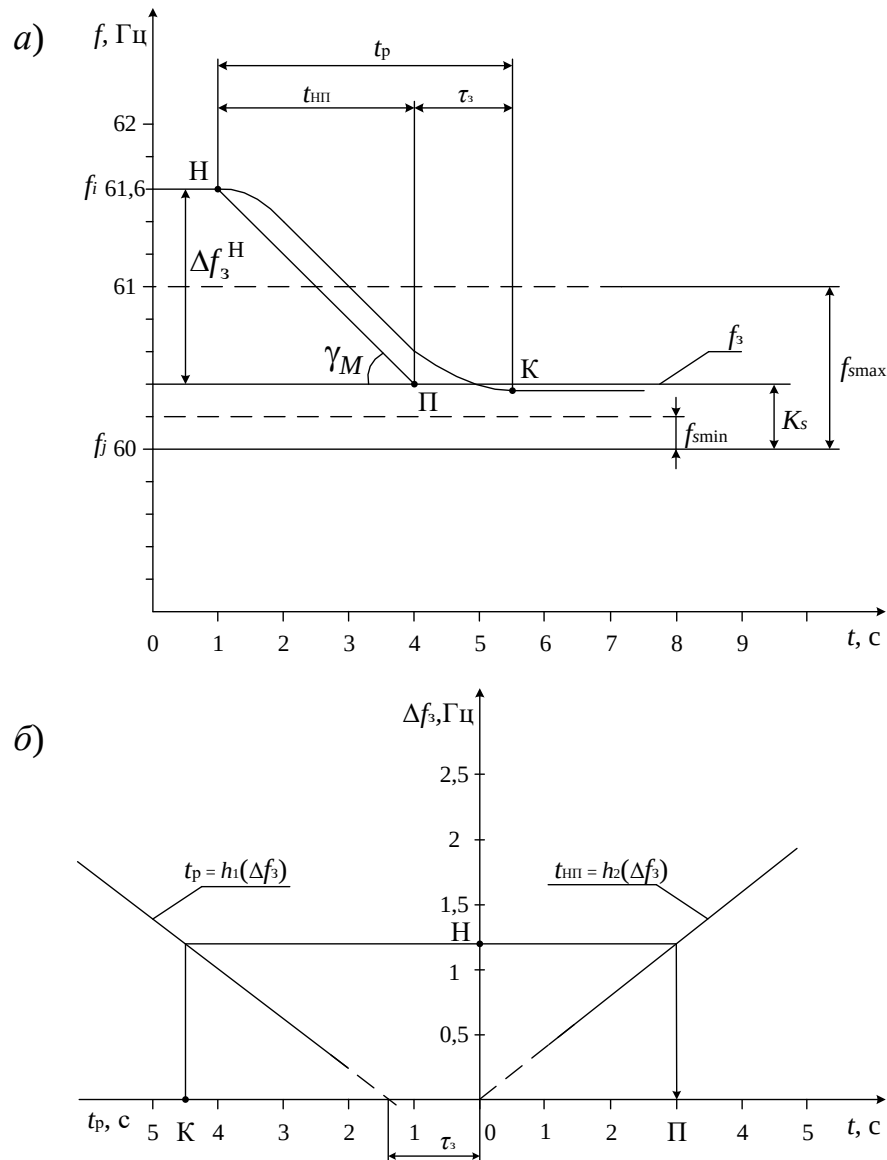


Рис. 6.4. Ілюстрація процесу (а) і визначення часових характеристик (б) підгонки частоти

У (6.38) позначено: S_H і S_K – початковий і кінцевий оператори, відповідно; A_1 – завдання числа реалізацій $n_{зад}$ і тривалості еталонного імпульсу $t_{IMP}(i) \in t_{IMP}$; A_2 – вимір поточного значення $f(i)$; A_3 – реєстрація поточних зна-

чень $t(i)$ і $f(i)$, як початкових умов переходу, тобто $t_h(i) \rightarrow t_h$, $f(i) \rightarrow f_h(i)$; A_4 і A_5 – установка «1» у каналах «Зменшення» і «Збільшення» обертів, відповідно; A_6 – формування на вивід GM впливів t_{IMP} ; A_7 – реєстрація поточного значення $f(i)$ як $f_{\Pi}(i)$, тобто визначення моменту зняття впливу $t_{IMP}(i)$; A_8 – вимір $f_i(i)$ і $f_{i+1}(i)$ з інтервалом $\tau = t_{i+1} - t_i$; A_9 – розрахунки $\Delta f(\tau) = |f_{i+1}(i) - f_i(i)|$; A_{10} – реєстрація $t(i)$ і $f(i)$, як кінцевих умов переходу, тобто $t_k(i)$ і $f_k(i)$; A_{11} – розрахунки $s(i)$, $t_p(i)$, $\tau_3(i)$ і $n_{\text{виб}}(i)$ за формулами (6.32), (6.33), (6.35) і (6.37) відповідно; A_{12} – зменшення числа на одиницю й запис $n_{\text{зад}} = n - 1$; A_{13} – розрахунки значень $s(M)$, $\tau_3(M)$, $n_{\text{виб}}(M)$ для $t_{\text{НП}}(i)$ за формулами (6.32), (6.34), (6.36); P_1, P_2, P_3, P_4 – умови виконання співвідношень $f(i) > f_{\text{ном}}$, $t_{\text{НП}}(i) - 1 = 0$, $\Delta f(\tau) < \Delta f(\tau)_{\text{доп}}$ і $n = 0$, відповідно; ω – безумовний перехід.

Ураховуючи результати експериментів, проведених у натурних умовах (див. §6.4), де використані визначені залежності $\Delta f = h_1(t_{IMP})$ і $t_p = h_2(\Delta f)$ для ГА СЕЕУ підтверджують практичну реалізованість наведеного алгоритму у судових МП-систмах управління при автоматичному визначенні s , τ_3 і $n_{\text{виб}}$.

Таким чином, теоретично і практично доведена ефективність використання пропонованого способу розв'язку завдання оптимального управління припасуванням[11-17] частоти при мінливих у процесі експлуатації параметрах системи.

6.3.2. Визначення моменту включення генераторних автоматів при детермінованій постановці завдання синхронізації

У § 6.2 показане, що визначення оптимального моменту включення генераторного автомата синхронізованого об'єкта пов'язане з розв'язком сукупності завдань, таких як: визначення взаємного розташування у просторі векторів однойменних фаз напруг синхронізованих об'єктів; розрахунки часу очікування $t_{\text{ож}}$ оптимуму синхронізації, тобто моменту геометричного збігу названих векторів, формування випереджального імпульсу на включення генераторного автомата синхронізованого об'єкта. Крім цього, у § 6.2 виконана

постановка (6.10) і визначений хід розв'язку завдань синхронізації (6.11), що дозволяє приступитися до розв'язку виділеної з них сукупності.

Відповідно до детермінованої постановки (6.4) взаємне розташування у просторі векторів однойменних фаз напруг синхронизованих об'єктів описане вираженням (6.6), яке, з обліком того, що у момент оптимуму синхронізації слушна рівність $\bar{r}_S^{(0)} = 0$, можна перетворити до виду

$$\bar{r}_{SY}^{(k)} = \bar{r}_{OS}^{(k)} + \Delta \bar{r}_S^{(k)},$$

де $\Delta \bar{r}_S^{(k)} = \bar{r}_S^{(k)} - \bar{r}_S^{(0)} = [t^{(k)} - t^{(0)}] \frac{d\omega_S^{(k)}}{dt} \cong |\Delta u_S^{(k)}| = U_{OS} U_{SY} \sin \frac{\omega_S}{2} [t^{(k)} - t^{(0)}]$ – вектор, що визначає зміни величини напруги, що обгинає за час $[t^{(k)} - t^{(0)}]$.

Оскільки вектор $\bar{r}_S^{(k)} = \bar{r}_{SY}^{(k)} \cdot \bar{r}_{OS}^{(k)} \cdot \sin \frac{\alpha^{(k)}}{2}$, а також, враховуючи, що $\bar{r}_S^{(0)} = 0$ і

випадок, коли $\frac{d\omega_S}{dt} = 0$ (режим зависання), за умовою завдання випадає з розгляду, одержимо:

$$\bar{r}_{SY}^{(k)} \bar{r}_{OS}^{(k)} \cdot \sin \frac{\alpha^{(k)}}{2} \cong U_{SY} U_{OS} \sin \frac{\omega_S}{2} [t^{(k)} - t^{(0)}],$$

$$\text{звідки } \alpha^{(k)} \cong \omega_S [t^{(k)} - t^{(0)}] \text{ або } [t^{(k)} - t^{(0)}] \cong t_{ож} = \frac{\alpha^{(k)}}{\omega_S}. \quad (5.39)$$

Таким чином, визначена залежність величини $t_{ож}$ від поточних значень ω_S і α , що дозволяє приступитися до розробки відповідного математичного забезпечення МП СУ СЕЕУ з урахуванням її можливостей і прийнятих способів виміру. Оскільки МП система ставиться до класу цифрових систем, то у основу способу виміру величин ω_S і α покладемо принцип рахунку кількості часових інтервалів за періоди синусоїдальних напруг U_{SY} , U_{OS} , за інтервал часу, що характеризує різницю фаз [17, 67, 250, 267-272, 277-280].

Умовимося так само, що МП-система містить необхідні формувачі цифрових сигналів, що відображають послідовності періодів напруг синхронизованих об'єктів ($T_{SY} = \frac{1}{f_{SY}}$) і ($T_{OS} = \frac{1}{f_{OS}}$) (див. рис. 6.5), а також логічний

пристрій додавання цифрових сигналів, що дозволяє визначити вимір куту α на часовому інтервалі T_S , який повністю відповідає періоду, що обгинає:

$$u_S = 2U_m \sin \frac{\omega_S}{2} t \text{ при } U_{SY} = U_{OS} = U_m.$$

Основними труднощами [59, 60, 71, 121, 129, 167-170], з яких доводиться зустрічатися при розробці математичного забезпечення МП пристроїв управління синхронізацією ГА [17], є одержання розрахункового вираження для величини часу $t_{ож}$ від початку виміру (І) куту α до точки оптимуму O_2 . Зв'язане це з тим, що протягом T_S значення кутів α на симетричних ділянках O_1M и MO_2 попарно збігаються. Тому використання залежності (6.39) для визначення часу $t_{ож}$ буде справедливо тільки на ділянці MO_2 :

$$t_{ож} = \frac{\alpha}{\omega_S} = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot T_S.$$

Оцінюючи шляхи розв'язку даного завдання, зупинимося на ідеї виміру двох послідовних значень кута α з подальшою оцінкою знаку їх різниці. При цьому можна встановити наступне: якщо $\alpha_1 < \alpha_2$, то процес виміру α проводиться на ділянці O_1M , при $\alpha_1 > \alpha_2$ – на ділянці MO_2 .

Однак, у випадках повного накладення часових інтервалів τ_i і τ_j , відзначена закономірність може бути порушеною, що приведе до помилки у визначенні знаку. Як видно з рис. 6.5, для даного випадку значення α уважаються мінімальними (α^*) і завжди будуть менше $\Delta T = |TOS - TSY|$. Тому для виключення можливих помилок вимірювані значення необхідно перевіряти за умовою $\alpha > \Delta T$.

Таким чином, можна записати наступні вираження для визначення шуканого параметру $t_{ож}$:

$$t_{ож} = \left(1 - \frac{\alpha}{2\pi}\right) T_S, \text{ якщо } \alpha_1 < \alpha_2; \quad t_{ож} = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot T_S, \text{ якщо } \alpha_1 > \alpha_2,$$

або враховуючи, що $T_S = \frac{T_{SY} T_{OS}}{|T_{SY} - T_{OS}|}$, $T_{OS} = 2\tau(j)$ і $T_{SY} = 2\tau_{SY}$, те одержимо у

остаточному виді вираження, необхідні для розв'язку поставленого завдання запропонованим методом:

$$t_{\text{ож}} = \left(2 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \cdot \frac{\tau_{OS} \cdot \tau_{SY}}{\tau_{OS} - \tau_{SY}}, \text{ якщо } \alpha_1 < \alpha_2 \quad (6.40)$$

$$t_{\text{ож}} = \frac{\alpha}{\pi} \cdot \frac{\tau_{OS} \cdot \tau_{SY}}{\tau_{OS} - \tau_{SY}}, \text{ якщо } \alpha_1 > \alpha_2. \quad (6.41)$$

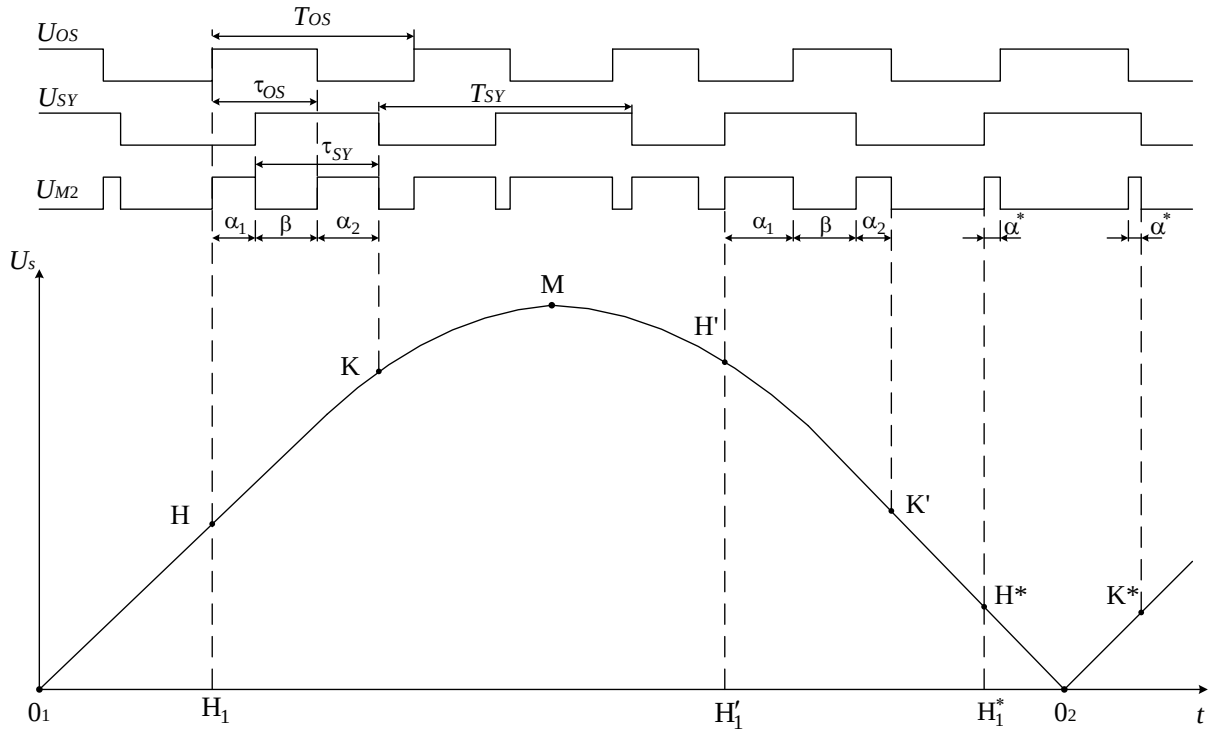


Рис. 6.5. Ілюстрація способу визначення параметрів синхронізації

При запропонованому підході до визначення $t_{\text{ож}}$ величину затримки часу τ_{ADV} на подачу випереджального імпульсу включення генераторного автомата можна розрахувати за формулою:

$$\tau_{ADV} = t_{\text{ож}} - t_{\text{ср.ц}}, \quad (6.42)$$

де $t_{\text{ср.ц}}$ – середній час спрацьовування елементів каналу включення генераторного автомата [17, 67, 268-272, 277].

Як бачимо з вираження (6.42), точність підключення синхронізованого об'єкта до об'єкта синхронізму залежить не тільки від точності виміру величин α і ω_s та розрахунків $t_{\text{ож}}$, але й від вірогідності поточного значення величини $t_{\text{ср.ц}}$.

У § 6.2 показано, що $t_{\text{ср.ц}} \cong Y_{SW}(i) = f_2(\tau_{AB}, \tau_{p1}, \tau_{p2}, \tau_{yc})$, тому для $t_{\text{ср.ц}}$ можна записати: $t_{\text{ср.ц}}(i) = \tau_{AB}(i) + \tau_M(i) + \tau_{p2}(i) + \tau_{yc}(i)$.

У процесі експлуатації САЕЕС, у міру виробітку ресурсу системи управління, апаратури сполучення й автоматичного вимикача, їх часові показники τ_{yc} , τ_{p1} , τ_{p2} , τ_{AB} – змінюються, що приводить до істотних змін $t_{cp.ц}$ і, як наслідок, до помилок у розрахунках $t_{cp.ц}$. Оскільки при цьому більшу вірогідність мають останні k – включень із n , що передують розрахункам величини $t_{cp.ц}(n+1)$, те для визначення останньої можна скористатися формулою

$$t_{cp.ц}(n+1) = \frac{\sum_{i=n-k}^n (\tau_{AB}(i) + \tau_{p1}(i) + \tau_{p2}(i) + \tau_{yc}(i))}{k} \quad (6.43)$$

Таким чином, ми отримали математичні вираження, що лежать у основі визначення оптимального моменту включення генераторного автомата синхронізованого об'єкта в умовах детермінованої постановки завдань управління процесом синхронізації ГА.

6.3.3 Визначення моменту включення генераторних автоматів при стохастичній постановці завдання синхронізації

Стохастичний підхід до розв'язку даних завдань обумовлений тим, що у реальних умовах СЕУ із ВГ піддана стохастичним збурюванням, як з боку гребного валу, так і від суднової мережі [32, 59, 60, 71, 73, 93, 121, 129, 167-170, 271]. При цьому зовнішні обурювальні впливи можуть викликати такі істотні зміни, не урахування яких при визначенні оптимального моменту включення генераторного автомата синхронізованого об'єкта може привести до невдалої синхронізації. У зв'язку із цим виникає необхідність у прогнозі змін T_C і T_{BG} із метою корегування величини $t_{ож}$, перевірки умов стійкості й формування керуючих впливів.

Для розв'язку цього завдання необхідно мати у своєму розпорядженні певний набір параметрів, що характеризують випадковий процес, статистично пов'язаним зі спостережуваним. До такого набору віднесемо:

$$T_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} ; \quad A_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n |A_i|}{n} ; \quad \frac{\Delta x}{\Delta t}_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^m |x_i - x_{i-1}|}{m \cdot t_{\text{ш}}},$$

де T_i – i -й період випадкового процесу $x(t)$, (див. рис. 6.6); а i – число періодів за час реалізації t_p ; $A_i = |x_{\text{зи}} - x_{\text{н}}|$ – відхилення спостережуваної величини x ($T_{\text{с}}$ або $T_{\text{вг}}$) від її номінального значення $x_{\text{н}}$ у точках екстремуму $x_{\text{зи}}^+$ і $x_{\text{зи}}^-$; $\frac{\Delta x}{\Delta t}_{\text{cp}}$ – середня швидкість зміни x за m кроків реєстрації; $t_{\text{ш}}$ – тривалість кроку реєстрації.

Обране значення $t_{\text{ш}}$ буде багато у чому визначати такі суперечливі показники виміру параметрів процесу, як точність і витрати машинного часу. Тому, якщо врахувати, що $\{T, A, \Delta x/\Delta t\}$ у реальних умовах змінюються у широких діапазонах, то вибір $t_{\text{ш}}$ повинен бути адаптивним. Оскільки змінні $\{T, A, \Delta x/\Delta t\}$ представлені у МП системі дискретно, те будемо вважати, що $t_{\text{ш}} = f(T, A, \Delta x/\Delta t)$ є ґратчаста функція зі змінним інтервалом дискретності, задана рекуррентними співвідношеннями або таблицями.

Якщо вважати, що циклічність звертання до процесу виміру задана й характеризується деяким періодом T_0 , причому:

$$T_0 = t_{\text{н}} + t_{\text{п}}; \quad t_{\text{н}} = N \cdot t_p; \quad t_p = K \cdot t_{\text{ш}},$$

а K, N і $t_{\text{п}}$ – відповідно, кількість точок реєстрації за час t_p , кількість реалізацій за час вимірів $t_{\text{н}}$, і тривалість паузи між вимірами, то визначення оптимального значення $t_{\text{ш}}$ зводиться до представленого на рис. 6.6 алгоритму.

Установивши у такий спосіб оптимальне значення $t_{\text{ш}}$, уводимо його у даний алгоритм за допомогою умови 8 і оператора 9 і визначаємо потім уточнені величини параметрів процесу. Оцінка їх, у свою чергу, дасть можливість зробити висновок про доцільність пошуку корекції управління процесом синхронізації і вибрати раціональний спосіб розрахунків. Висновок про доцільність можна зробити на основі аналізу співвідношень величин, що характеризують спостережуваний процес $\{T_{\text{с}}, T_{\text{вг}}, TS\}$ і статистично пов'язаний з ним випадковий процес $\{T_{\text{cp}}, A_{\text{cp}}, \Delta x/\Delta t\}$.

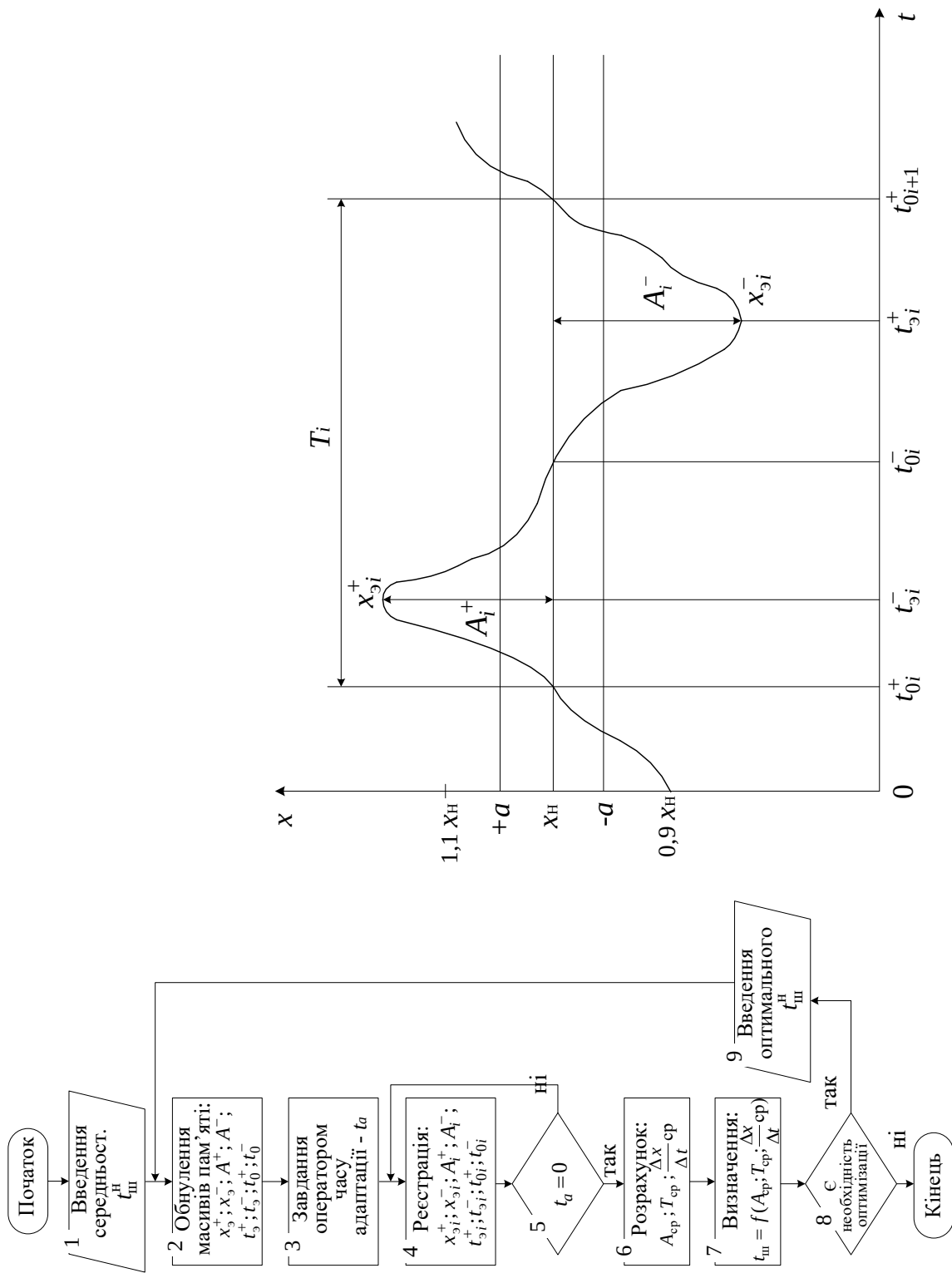


Рис. 6.6. Характеристики випадкового процесу і алгоритм їх визначення

Якщо дані співвідношення такі, що виконуються умови нечутливості процесу синхронізації до змін параметрів випадкового процесу, то необхідність у прогнозі T_c і T_{BG} і корекції параметрів і $t_{ож}$ відпадає. У вкрай протилежному випадку, коли випадковий процес більш динамічний, чим спостережуваний, тобто $\frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ср} \gg \frac{\Delta T_{BG}}{\Delta t}$ або $\frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ср} \approx \frac{\Delta T_c}{\Delta t}$, те результати прогнозу будуть далекі від істини. У зв'язку із цим доцільним є переклад управління процесом синхронізації у режим безперервного виміру T_c і T_{BG} і розрахунків $t_{ож}$ до формування команди на включення генераторного автомата за умовою $t_{ож} = t_{ср.ц.}$

Прогноз будемо вважати доцільним до тієї пори, якщо динаміка розглянутих процесів визначається співвідношеннями одного порядку, тобто

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ср} \approx \frac{\Delta T_{BG}}{\Delta t} \text{ або } \frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ср} \approx \frac{\Delta T_c}{\Delta t}. \quad (6.44)$$

Якщо виконуються умови $T_{ср} \gg TS$ і $\frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ср} \approx \frac{4A_{ср}}{T_{ср}}$, то випадкова величина $x(t)$ має більші амплітудні відхилення від x_H , але змінюється поступально й повільно (з малими збільшеннями Δx). У цьому випадку метод лінійного екстраполювання забезпечить достатню точність пророкування випадкового процесу через час $t_{ож}$: $t_{ож} = f(\alpha, \tau_{OS}, \tau_{SY})$.

Якщо виконуються умови $T_{ср} \leq TS$ і $\frac{\Delta x}{\Delta t} \gg \frac{4A_{ср}}{T_{ср}}$, то для випадкової величини $x(t)$ характерними є короткочасні, значні викиди ("Завдання про викиди"), між якими $x(t) = x_H$. У цьому випадку поведінку випадкового процесу можна передбачити за імовірнісними характеристиками: середнє число викидів випадкової функції за даний рівень, імовірність появи викидів за даний час, середня тривалість викиду. Розв'язок "Завдань про викиди" у цьому випадку спрощується тим, що дані для розрахунків $\{A_i, v_a, t_a\}$ уже визначені у процесі оптимізації $t_{ш}$. Тому, зважаючи на те, що процеси зміни T_c і T_{BG} ма-

ють нормальний закон розподілу, можна визначити число викидів $\bar{n}_a$ протягом часу TS за рівень $\pm a$:

$$\bar{n}_a = T_S \cdot \bar{v}_a,$$

де $\bar{v}_a = \frac{v_a}{t_a}$ – середнє число викидів за рівень $\pm a$ у одиницю часу, причому,

величина v_a перебуває шляхом порівняння всіх значень A_i , що мали місце на інтервалі t_a з величиною a й визначається числом, коли $A_i > a$. Імовірність появи v викидів у даних умовах наближено визначиться формулою Пуасона:

$$P(v) = \bar{n}_a \cdot e^{-\bar{n}_a} / v!$$

Інформація про викиди $\{t_3^+, t_3^-\}$, що мали місце на даний момент, і оцінка значень $\bar{n}_a$ і $P(v)$ дозволяють зробити вивід про ймовірність удакої синхронізації.

Якщо виконуються умови $T_{cp} \approx TS$ і $\frac{\Delta x}{\Delta t} \approx \frac{4A_{cp}}{T_{cp}}$, то випадкова величина

$x(t)$ має помірні відхилення від x_H , змінюється швидко й поступально. Тому прогноз $x(t + t_{ож})$ вимагає більшого набору імовірнісних характеристик (математичне очікування випадкового процесу і його кореляційну функцію, функції розподілу або спектральної щільності). Доцільність їх визначення залежить від структури МП-системи у заданих умовах її застосування.

Розв'язок даного завдання є ефективним у багаторівневих МП-комплексах, що мають на верхньому ієрархічному рівні швидкодіючий контролер з розвиненим ПЗ. На нижньому, локальному рівні МП-комплексів СЕУ, як правило, вирішуються завдання безперервного виміру, контролю параметрів і управління встаткуванням.

Тому завдання визначення імовірнісних характеристик на цьому рівні у рамках реального часу є скрутним. Проте, для організації орієнтованого прогнозу випадкової величини на локальному рівні можна використовувати метод лінійної екстраполяції у межах $\pm A_{cp}$ відповідно до співвідношення (6.44), що ілюстровано рис. 6.7.

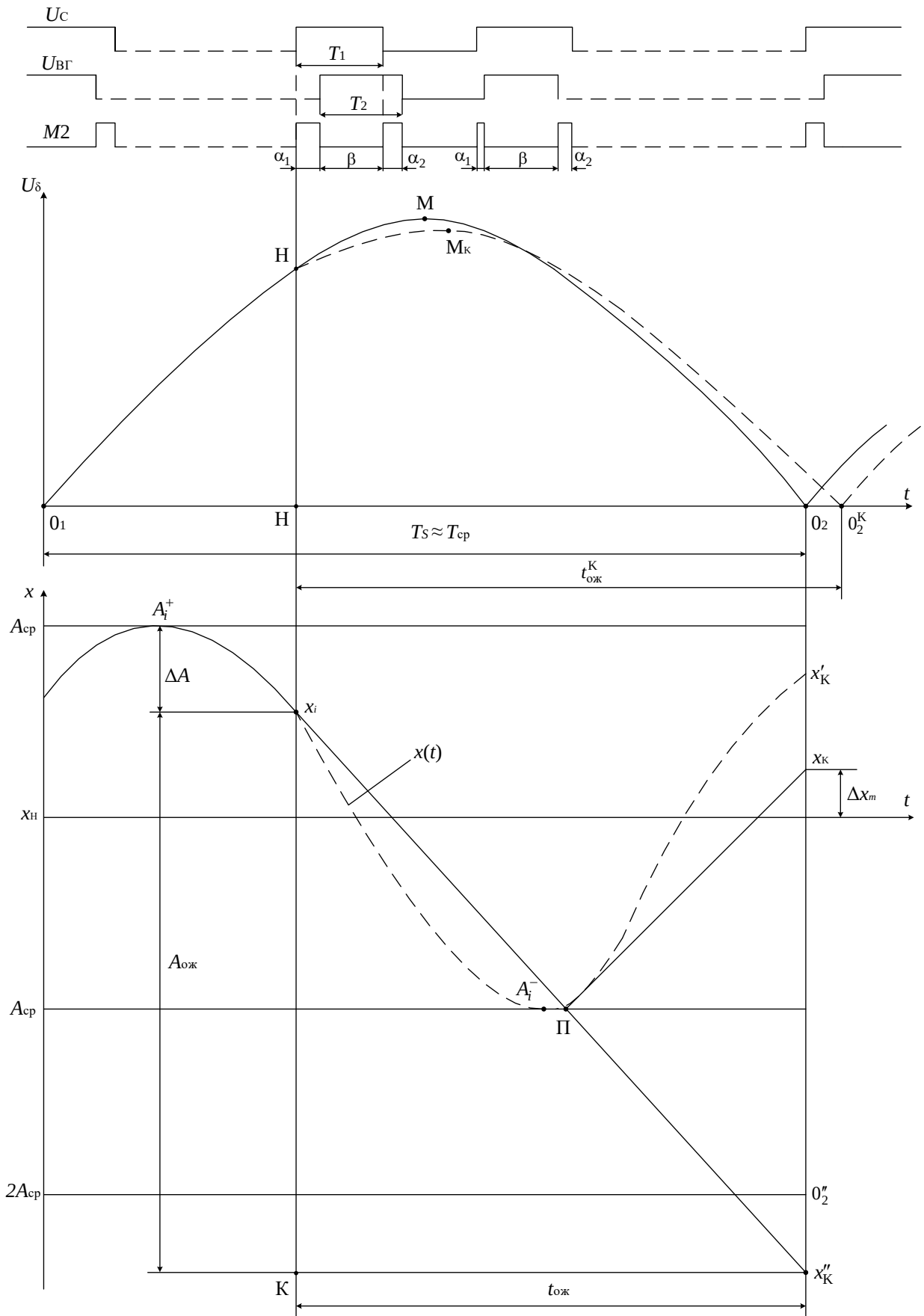


Рис. 6.7. Ілюстрація процесу визначення і організації прогнозу параметрів синхронізації

При цьому для будь-якої точки x_i амплітудні зміни за час $t_{\text{ож}}$ складуть:

$$A_{\text{ож}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} t_{\text{ож}}.$$

Оцінюючи положення x_i щодо найближчого екстремуму – $\Delta A = A_i^3 - |x_i - x_H|$, можна визначити прогнозоване відхилення Δx_m від номінального значення x_H :

$$\Delta x_m = |x_K O_2| = A_{\text{ож}} - mA_{\text{ср}} \pm \Delta A,$$

де $m \in \{1, 2, 3, 4\}$ вибирається залежно від значень $t_{\text{ож}}$ і $A_{\text{ср}}$.

У такому випадку алгоритм розв'язку зводиться до логічної схеми:

$$\begin{array}{cccccccccccccccccccc} S_H & A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 & A_7 & P_1 & \uparrow & A_8 & P_2 & \uparrow \downarrow & A_{10} & \downarrow & A_{12} & P_3 & \uparrow & A_{13} & P_4 & \uparrow & A_{14} & P_5 & \uparrow & A_{15} & \omega & \uparrow \\ 5 & 7 & 4 & 8 & 3 & 9 & 2, 12 & 10 & 1 & 11 & 12, 6, 7, 8, 9 & & & & & & & & & & & & & & & & \\ \downarrow & A_{16} & \omega & \uparrow & \downarrow & A_{17} & \omega & \uparrow & \downarrow & A_{18} & \omega & \uparrow & \downarrow & A_{11} & \omega & \uparrow & \downarrow & A_9 & P_2 & \uparrow & \omega & \uparrow & \downarrow & A_{19} & S_K, \end{array} \quad (6.45)$$

де S_H і S_K – початковий і кінцевий оператори, відповідно; A_1 і A_3 – запис x_i у ПП» і «ПП», відповідно; A_2 – витримка часу Δt ; A_4 – розрахунки $\Delta \Pi = \langle \text{ПП} \rangle - \langle \text{ПП} \rangle$; A_5 – розрахунки $\Delta x = \langle \text{ПП} \rangle - x_H$; A_6 – розрахунки $\Delta A = A_{\text{ср}} - \Delta x$; A_7 – розрахунки $A_{\text{ож}} = \frac{\Delta \Pi}{\Delta t} t_{\text{ож}}$; A_8 – установка знаків «+» для Δx_1 і Δx_4 , «-» для Δx_2 і Δx_3 ; A_9 – установка знаків «+» для Δx_2 і Δx_3 , «-» для Δx_1 і Δx_4 ; A_{10} – розрахунки $A_{\text{ож}}^3 = A_{\text{ож}} - \Delta A$; A_{11} – $A_{\text{ож}}^3 = A_{\text{ож}} + \Delta A$; A_{12} , A_{13} і A_{14} – розрахунки $\delta = A_{\text{ож}}^3 - A_{\text{ср}}$, $\delta_2 = A_{\text{ож}}^3 - 2A_{\text{ср}}$ і $\delta_3 = A_{\text{ож}}^3 - 3A_{\text{ср}}$, відповідно; A_{15} , A_{16} , A_{17} і A_{18} – визначення параметрів $\Delta x_4 = \delta_3$, $\Delta x_3 = \delta_3$, $\Delta x_2 = |\delta_2 - A_{\text{ср}}|$ і $\Delta x_1 = \delta_1$, відповідно; A_{19} – розрахунки $x_K = x_H + \Delta x_m$; P_1 , P_2 , P_3 , P_4 і P_5 – перевірка умов $\Delta x > 0$, $\Delta \Pi > 0$, $\delta_1 > 0$, $\delta_2 > 0$, $\delta_3 > 0$, відповідно; ω – безумовний перехід.

Можна стверджувати, що запропоновані способи, засновані на теорії випадкових функцій, дозволяють із заданою точністю оцінити випадковий процес і вибрати ефективний метод прогнозування. Крім того, визначення кроку реєстрації значень випадкового процесу за адаптивним законом дозволяє варіювати їм для задоволення заданих точності виміру й витрат машинного часу при зміні параметрів процесу синхронізації у широкому діапазоні.

6.4. Фізична модель САЕЕС і результати експериментів зі синхронізації суднових генераторних агрегатів

Наведемо короткий опис використаної при дослідженнях фізичної моделі (ФМ) повномасштабної САЕЕС, за допомогою якої проводилася оцінка адекватності реальним фізичним процесам запропонованих у дисертації алгоритмів управління синхронізацією генераторних агрегатів [1, 2, 10-19], [20, 27, 29, 37] і [23, 25, 26, 32, 33]. Загальна функціональна схема [20, 27, 29, 37] ФМ САЕЕС, спільно з секціями ГРЩ, показана на рис. 6.8. Основне устаткування і позначення елементів (1, ..., 47) наведені далі (див. рис. 6.8).

1, 2 - секції дизель-генераторів № 1 і № 2, що містять генераторні автоматичні вимикачі серії Masterpact NT06H1 з блоком управління Micrologic 7P і комунікаційним модулем зв'язку, вимірювачі параметрів мережі, шини ГРЩ, мікроконтролери генераторів C6200, C6250 і дизелів M2500, комутаційно-захисну апаратуру і блоки живлення ланцюгів управління і сигналізації, щитові прилади і органи управління, сигналізації;

3 - секція синхронізації і управління ГРЩ, що містить три модулі аварійно-попереджувальної сигналізації, щитові прилади з подвійними шкалами, синхроноскоп, перемикач вибору режимів роботи СЕС, моторизовані потенціометри завдання збудження синхронних генераторів і частоти обертання дизелів, комутаційно-захисна апаратура і блоки живлення ланцюгів управління і сигналізації, мікроконтролер Modicon M340 SCADA з модулями розширення, органи управління і сигналізації, шини ГРЩ;

4 - секція ВГ ГРЩ, що містить мікроконтролери C6200, C6250, BR-7000-T15, MMI7000, Alpha 2, генераторний автоматичний вимикач NSX100N з блоком управління Micrologic 2E, комутаційно-захисну апаратуру і блоки живлення ланцюгів управління і сигналізації, щитові прилади, органи управління і сигналізації, частотний перетворювач Altivar 71 приводного асинхронного електродвигуна, з'єднаного муфтою з валом генератора, з можливіс-

тю зміни частоти обертання агрегату (наприклад, імітуючи режими роботи гребного валу, хитавицю і т.п.);

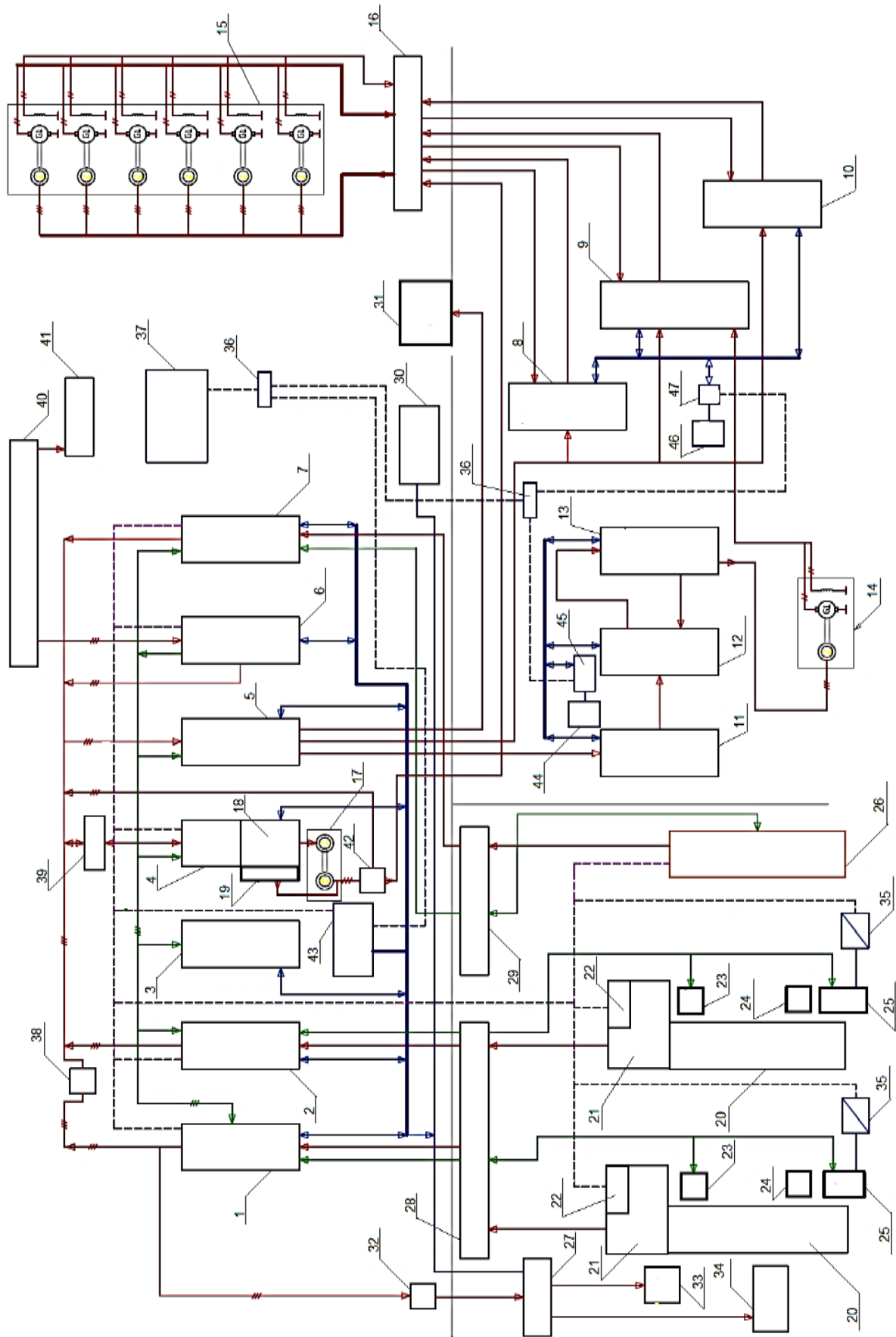


Рис. 6.8. Функціональна схема ФМ САЕЕС

5 - секція ГРЩ групових споживачів № 1 (з трифазної резистивним навантаженням потужністю 12 кВт, два окремих електромеханічних модуля навантаження, що складаються з частотно-керованих електроприводів з навантажувальними генераторами постійного струму) містить окремі фідерні, дистанційно керовані, автоматичні вимикачі кожного із споживачів, комутаційно-захисну апаратуру і блоки живлення ланцюгів управління і сигналізації, щитові прилади, органи управління і сигналізації;

6 - секція окремого енергопостачання від "берегових мереж", включає пристрій контролю параметрів мережі, мікроконтролер С6200, прилад контролю послідовності фаз, автоматичний вимикач, комутаційно-захисну апаратуру і блоки живлення ланцюгів управління і сигналізації, щитові прилади і органи управління і сигналізації;

7 - секція аварійного (стоянкового) ДГ (аварійний розподільний щит АРЩ), що містить багатофункціональний мікроконтролер PPM-3 EDG, генераторний автоматичний вимикач Terasaki TN32 з блоком контролю і управління, комутаційно-захисну апаратуру і блоки живлення ланцюгів управління і сигналізації, щитові прилади і органи управління і сигналізації;

8, 9, 10 - секції групових споживачів № 2. Містять шість окремих електромеханічних модулів, що складаються з частотно-керованих електроприводів з перетворювачами частоти різних виробників і навантажувальними генераторами постійного струму, з перетворювачами напруги постійного і змінного струму різних виробників, з навантажувальні генераторами постійного струму, що містять мікроконтролер FX3U з модулями розширення, який здійснює управління всіма перерахованими електромеханічними модулями. Тут реалізується типовий для суднових механізмів і комплексів характер навантажень. Є, також, графічний дисплей і пристрій введення-виведення типу GT1575-VNBD, пов'язаний з FX3U, що відображає мнемосхеми згаданих електромеханічних модулів з можливістю їх дистанційного керування, візуалізації, параметрування,

11 - високовольтна комутаційно-розподільна секція (типу AD1- комплектная комірка силового введення) ГРЩ серії MCset 7,2 кВ, яка містить високовольтний вакуумний автоматичний вимикач типу Evolis (Merlin Gerin) 7P1630, багатофункціональний мікропроцесорний термінал захистів серії SEPAM S20, а також програмований логічний контролер серії QJ61BT11N, Q00UICPU с модулями введення/виведення QX80, контролер D1000 для захисту від електричної дуги і графічний дисплей з пристроєм введення/виведення типу GT14 для візуалізації стану елементів і пристроїв високовольтного обладнання, а також їх місцевого та дистанційного управління, комутаційно-захисну апаратуру і блоки живлення ланцюгів управління і сигналізації, щитові цифрові прилади;

12 - високовольтна фидерная секція MTP + FVNR (AAM59148), що містить високовольтні вакуумні контактори, запобіжники, багатофункціональний МП-термінал захистів серії SEPAM S40, комутаційно-захисну апаратуру, блоки живлення ланцюгів управління і сигналізації, щитові цифрові прилади;

13 - високовольтна секція УНО електроприводу типу RVSS, що містить тиристорний перетворювач напруги з мікроконтролером управління і дисплеєм користувача, комутаційно-захисну апаратуру і органи управління;

14 - електромеханічний модуль, що містить синхронний з постійними магнітами електродвигун, з'єднаний муфтою з навантажувальним генератором постійного струму. Генератор підключений до навантажувальних резисторів, комутованих за допомогою програмованого контролера за заданим алгоритмом, наприклад, відповідно типовому характеру навантаження гребного валу судна;

15 - комплекс електромеханічних модулів, що містять електродвигуни, які з'єднані муфтою з навантажувальні генераторами постійного струму. Генератори підключені до навантажувальних резисторів, комутованих за допомогою програмованого контролера за алгоритмом, наприклад, відповідно типовому характеру навантаження суднових механізмів;

16, 27, 28, 29, 40 - розподільні щити силових ланцюгів, ланцюгів управління і комунікаційних зв'язків, що містять комутаційно-захисну апаратуру, блоки живлення ланцюгів управління і сигналізації, щитові прилади і локальні органи управління допоміжних систем, світлову сигналізацію, функціональні перетворювачі;

17 - генераторна установка, що складається з асинхронного генератора і приводного електродвигуна;

18 - силові тиристорні модулі (12 шт) системи компенсації реактивної потужності типу TSM - LC-I, багатофункціональний вимірювальний інтерфейс MMI7000-S; 353

19 - конденсаторні блоки;

20, 21 - дві ДГ установки PowerLink типу GMS10PX, дизель 20, типу PX380G, синхронний безщітковий генератор 21 STAMFORD типу P. I044E1;

22 - два мікроконтролери ДГ установки типу DSE-7320;

23 - автоматичний регулятор напруги і система збудження синхронних генераторів типу AS480 AVR (два комплекти);

24 - виконавчий механізм (сервопривід, актуатор) паливної рейки дизеля типу ADC-225S-24 (два комплекти);

25 - два цифрових регулятора обертів дизелей типу SDG514-0101;

26 - аварійний (стояночний) ДГ типу ALIZE 6000E / 7500TE, двигун моделі HONDA GX 390 OHV з дистанційним електростартерним запуском, синхронний генератор 5,6 кВт, 400 В, фірми SDMO;

30 - станція пожежної сигналізації типу JABLOTRON OASIS JA-83K;

31 - розподільний щит споживача (12,5 кВт) енергії електростанції;

32 - перемикаючий пристрій;

33 - трифазне резистивне навантаження;

34 - система вентиляції і кондиціонування у приміщеннях ФМ електростанції (трифазний зовнішній блок) сумарною потужністю 6 кВт;

35 - комунікаційний перетворювач-адаптер;

36 - комунікаційний перемикач;

37 - система дистанційного управління і контролю режимних параметрів обладнання фізичної моделі на базі мікроконтролерного комплексу Modicon M340 з модулями розширення SCADA;

38 - секційний роз'єднувач (ручний) типу Interpact INS-40-160 4P;

39 - 4 ступені конденсаторних блоків серії PhiCap із елементами захисту (система компенсації реактивної потужності);

41 - комутаційний шафа, що містить інтернет-уведення, комутатор з 24 портами D-Link, маршрутизатор Atheros AR9344, систему відеоспостереження з 18 IP відеокамерами типу NVIP-2DN3020V / IR-1P, WiFi-точка доступу з можливістю створення спільного покриття, програмований контролер;

42 - дистанційне перемикаючий пристрій RCA iC60 4P;

43 - програмований логічний контролер Modicom M340 з модулями розширення SCADA;

44 - графічний дисплей типу GT14;

45 - програмований логічний контролер серії QJ61BT11N, Q00UICPU з модулями введення / виведення - QX80;

46 - графічний дисплей типу GT1575-VNBD;

47 - програмований логічний контролер FX3U з модулями розширення.

Секції груп споживачів можуть виконувати функції автоматизованих електромеханічних систем окремих суднових механізмів з їх типовими навантаженнями і розглядатися як окремі суднові системи і комплекси. Функціональна схема типової електромеханічної системи з PLC-управлінням навантаженням представлена на рис. 6.9. На рис. 6.9 показані наступні елементи.

QF1 - дистанційно керований автоматичний вимикач з модулями захистів; QF2, QF3 - автоматичні вимикачі; KM1, KM2 - контактори; Converters - перетворювачі частоти (напруги), що використовуються у фізичній моделі; SCR - керований перетворювач напруги для живлення обмотки збудження навантажувального генератора G1; PLC - програмований логічний контролер фірми Mitsubishi Electric; SS - датчик частоти обертання агрегату; CS, VS - датчики струму навантаження і напруги генератора постійного струму.

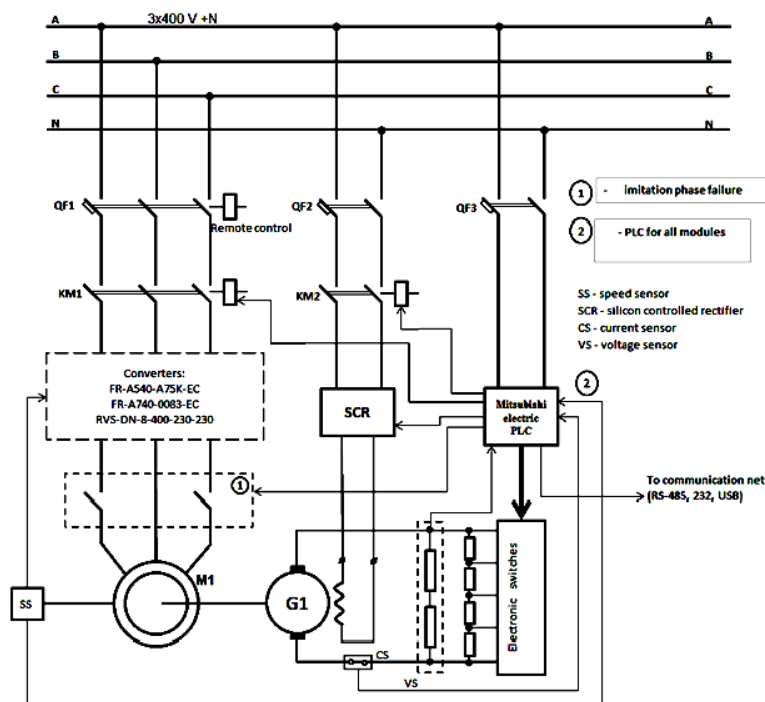


Рис. 6.9. Приклад реалізації схеми електромеханічного модуля з МП-управлінням навантаженням двигуна M1

Також використані Electronic switches - електронні керовані ключі (твєрдотїльні реле); M1 - електродвигун. В якості силових перетворювачїв таких електромеханїчних модулїв використовуютьсє перетворювачї: частотнї FR - A740, FR - A540, Altivar 71 фїрм Mitsubishi Electric і Schneider Electric і / або перетворювачї напруги RVS-DN, Altistart 48 фїрм Solcon і Schneider Electric. Робочим механїзмом (навантаженням) кожного з електродвигунїв служить навантажувальний генератор постїйного струму, з'єднаний з валом електродвигуна. Навантаження генератора змїнюється пїдключенням, за допомогою вїдповїдного мїкроконтролера, навантажувальних резисторїв за певним алгоритмом, вїдповїдно характеру навантаження реального суднового механїзму.

Програмований логїчний контролер Modicon M340 фїрми Schneider Electric з модулями розширення і вїдповїдним середовищем для програмування Unity Pro S v.7.0 використано у якостї платформи для вїзуалїзацїї та дистанцїйного управлїння режимами роботи всїєї фїзичної моделї CAEES і його окремих пристроїв. Диспетчерське (операторське) управлїння і збір режимних даних з устаткування ФМ, а також органїзацїя та проведення безпо-

середнього дослідного процесу здійснюється за допомогою спеціалізованого ПЗ - SCADA Expert Vijeo Citect V7.40.

Гнучкість обладнання і системи автоматики ФМ САЕЕС розширює функціональні можливості кофігурування, інтегрування додаткового обладнання і програмних продуктів окремих елементів і пристроїв. Усе обладнання, а також засоби автоматики об'єднані у єдину комунікаційну керуючу і інформаційну мережу з підтримкою основних комунікаційних протоколів, використовуваних на судах, таких як Modbus, Fielbus, CANopen, Ethernet, CC-Link з можливістю віддаленого управління, моніторингу та передачі даних.

Система автоматичного управління СЕЕС (Power Management System, PMS) виконана на базі мікроконтролерів C6200.0100 FlexGen Advanced фірми *SELCO* і мікроконтролерів PPM-3 EDG фірми *DEIF*, вбудованих у всі генераторні секції, а також секцію "живлення з берега".

Основна СЕЕС складається з двох дизель-генераторних агрегатів типу *GMS10PX* ф. *Powerlink Machine Co*, номінальною потужністю генераторів 8 кВт, напругою 380/220 В. Приводні двигуни синхронних безщіткових генераторів №1 і №2 - дизелі типу *PX380G*. Управління дизелями здійснюється мікроконтроллерами *DSE7320* (локальний ПЛК) фірми *Deep Sea Electronics Plc* і мікроконтроллерами *M2500* фірми *SELCO*, які вбудовані в кожен секцію синхронного генератора. Третім генератором є асинхронний, на базі серійної асинхронної машини потужністю 3,0 кВт. Приводний асинхронний електродвигун потужністю 4,0 кВт. Для живлення і управління приводним електродвигуном (тобто імітацією поведінки гребного валу на реальному судні у залежності від режиму роботи головного двигуна, погодних умов плавання тощо).

На головному комп'ютері встановлена операційна система сервера і спеціалізоване ПЗ SCADA Expert Vijeo Citect V7.40, за допомогою якого, можна управляти як СЕЕС, так і окремими електромеханічними об'єктами у автоматизованому або автоматичному режимах роботи, встановлювати пріоритети управління операторами, контролювати і реєструвати їх дії. На сервері

рі встановлюється, також, додаткове ПЗ для всіх контролерів, силових перетворювачів і т.п. Сервер підключений до Інтернет.

Схема мереж управління і комунікацій ФМ САЕЕС з прив'язкою до секцій ГРЩ, окремими елементами і модулями представлена на рис. 6.10.

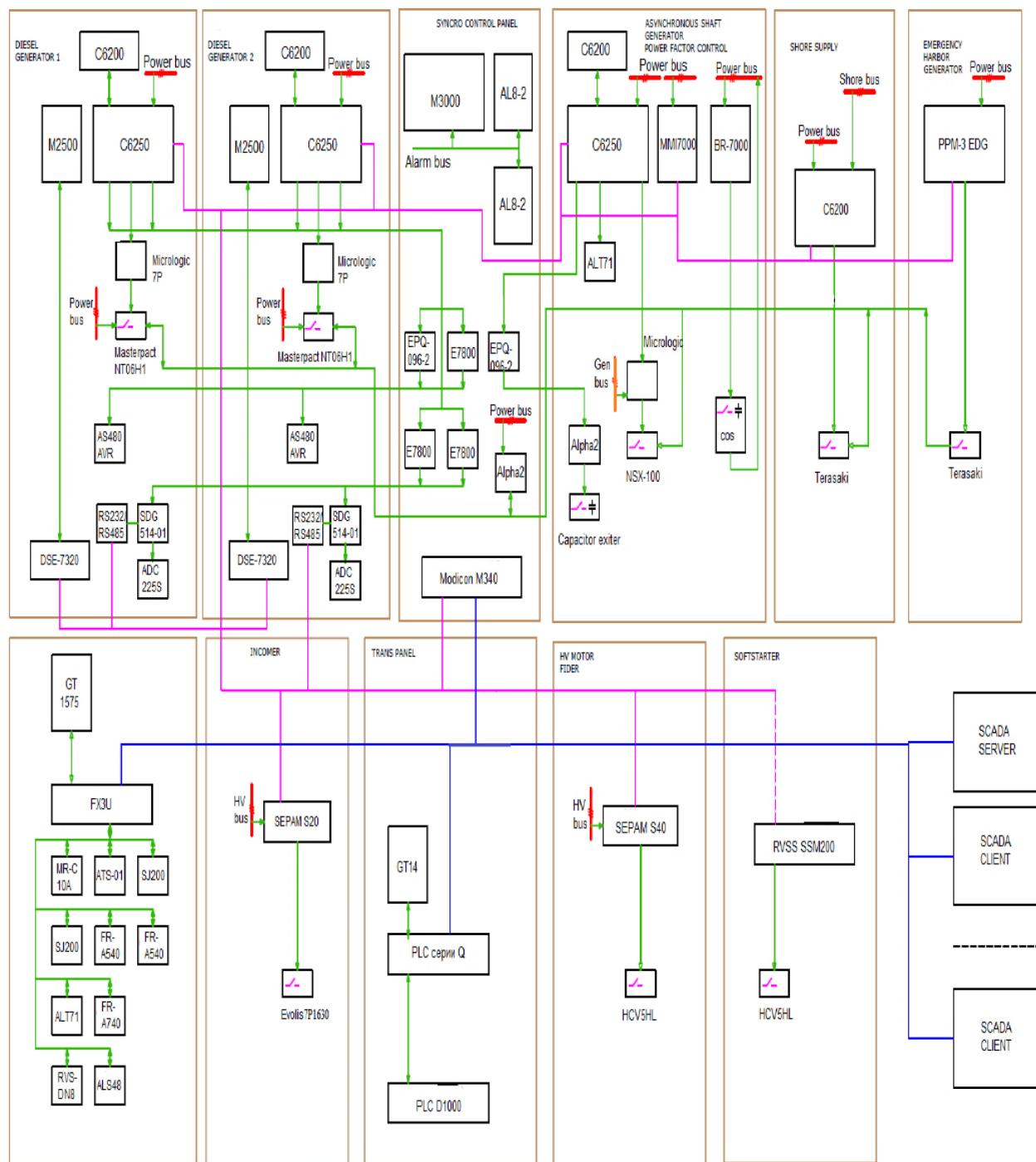


Рис. 6.10. Загальна схема мереж управління і комунікацій ФМ САЕЕС

Тут рожевої лінією показана комунікаційна мережа Modbus, синьою лінією показана комунікаційна мережа Ethernet, зеленою - комунікаційна ме-

На рис. 6.11 наведена блок-схема задіяних компонентів ТСЕУ при регулюванні коефіцієнтів закону регулювання при підгонці [16] частоти і напруги. На рис. 6.11 позначені наступні елементи.

DG1, DG2 - два ДГ типу GMS10PX компанії POWER LINK з дизельними двигунами PX380G (див. рис. 6.12), кожен з яких укомплектовано актуатором паливної рейки ADC225S-24, регулятором обертів SDG-514 Smart Digital Governor і генератором STAMFORD UL 1446 10 кВ, 380В, 50 Гц під управлінням регулятора напруги AS480.



Рис. 6.12. Дизель-генератори ФМ САЕЕС: розташування у вентильованому морському контейнері

MSB1, MSB2 - секції управління DG1 і DG2, відповідно (див. рис. 6.13). У секціях MSB1 і MSB2 встановлені по одному генераторному автомату Masterpact NT06 (ACB), які підключають кожен ДГ до головної шини. На передніх панелях MSB1 і MSB2 встановлені дисплеї контролерів PPM-3 DG фірми DEIF. Контролери PPM-3 DG являють собою систему захисту і управління потужністю СЕЕС (PPM-3). Це стандартна схема система управління потужністю для морського застосування. Система здійснює функції управління, контролю і захисту генераторів. Функції управління потужністю закладені у всіх генераторних блоках, таким чином, що кожен блок системи може бути і керованим.



Рис. 6.13. Станція управління дизель-генераторами ФМ САЕЕС

Один з генераторних блоків визначається системою як «Керуючий блок». Це блок здійснює функції запуску за пріоритетами, а також інші функції управління потужністю СЕЕС. У разі виходу з ладу керуючого блоку, всі функції управління потужністю СЕЕС передаються іншому доступному блоку.

MSB3 - секція синхронізації і збору помилок. При вирішенні завдань підгонці [16] частоти ДГ використано електронний потенціометр (див. рис. 6.14) EPQ 96-2 DEIF з релейним керуванням і аналоговим виходом (постійна напруга 0...10 В) у якості інтерфейсу між контактами, що видають сигнал на підвищення/пониження (PPM 3DG) швидкості, і пристроєм, що вимагає управління за допомогою аналогового сигналу (SDG-514 Smart digital governor).

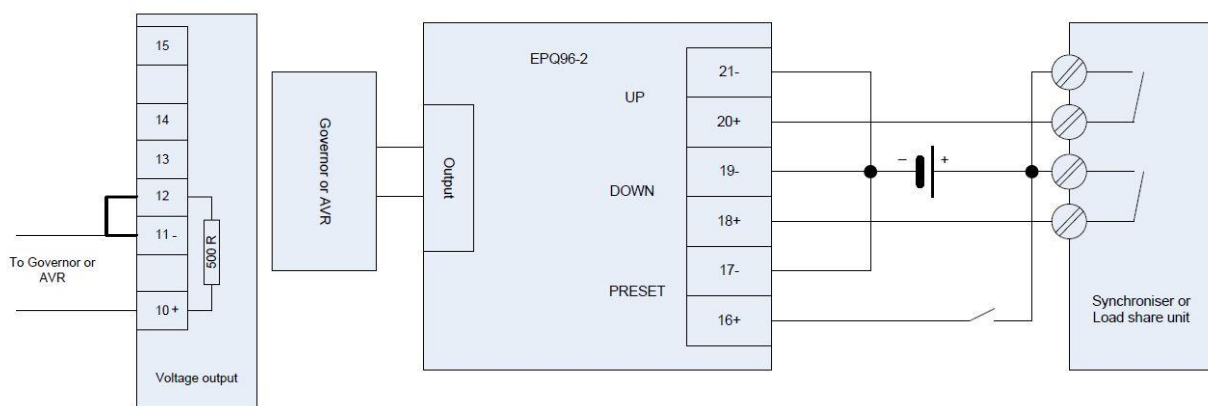


Рис. 6.14. Електронний потенціометр і його підключення

У експериментах підгонці [16] напруги і частоти ДГ застосований моторизований потенціометр E7800 SELCO з релейним управлінням і змінним опором на виході (рис. 6.15). Приводний потенціометр E7800 використовується у якості інтерфейсу між контактами, що видають сигнал на підвищення/пониження (PPM 3DG), і пристроєм, що вимагає управління за допомогою зовнішнього потенціометра (AVR AS-480). Приводний потенціометр являє собою пристрій з потенціометра і електродвигуна з муфтовим

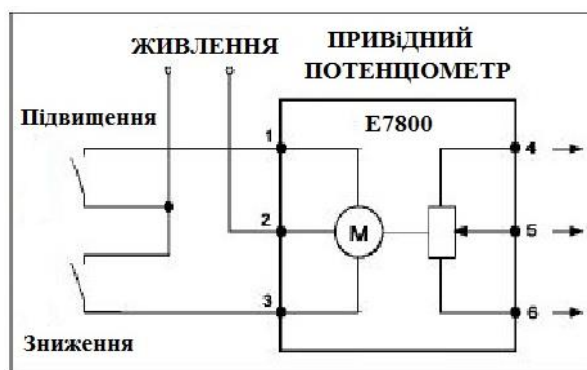


Рис. 6.15. Підключення моторизованого потенціометру

з'єднанням. Існує прямий механічний зв'язок між потенціометром і рукояткою, яка забезпечує доступ до ручного (за необхідністю) регулювання.

OWNER PC - термінал видаленої конфігурації контролерів організований на базі персонального комп'ютера OWNER-PC (див. рис. 6.16). Зв'язок з контролерами організовано у мережах RS485, за допомогою перетворювача інтерфейсу RS485/USB. На комп'ютері встановлені наступні програмні продукти: Utility Software3 PPM3 DEIF. Забезпечує віддалений доступ до трьох контролерів PPM3, встановлених у MSB1, MSB2, MSB7; ПЗ Team Viewer для управління і спостереження за віддаленим комп'ютером; SCADA CITECT 7.1 з проектом "RIME"; PC1, PC2, PC3, PC4 - персональні комп'ютери.

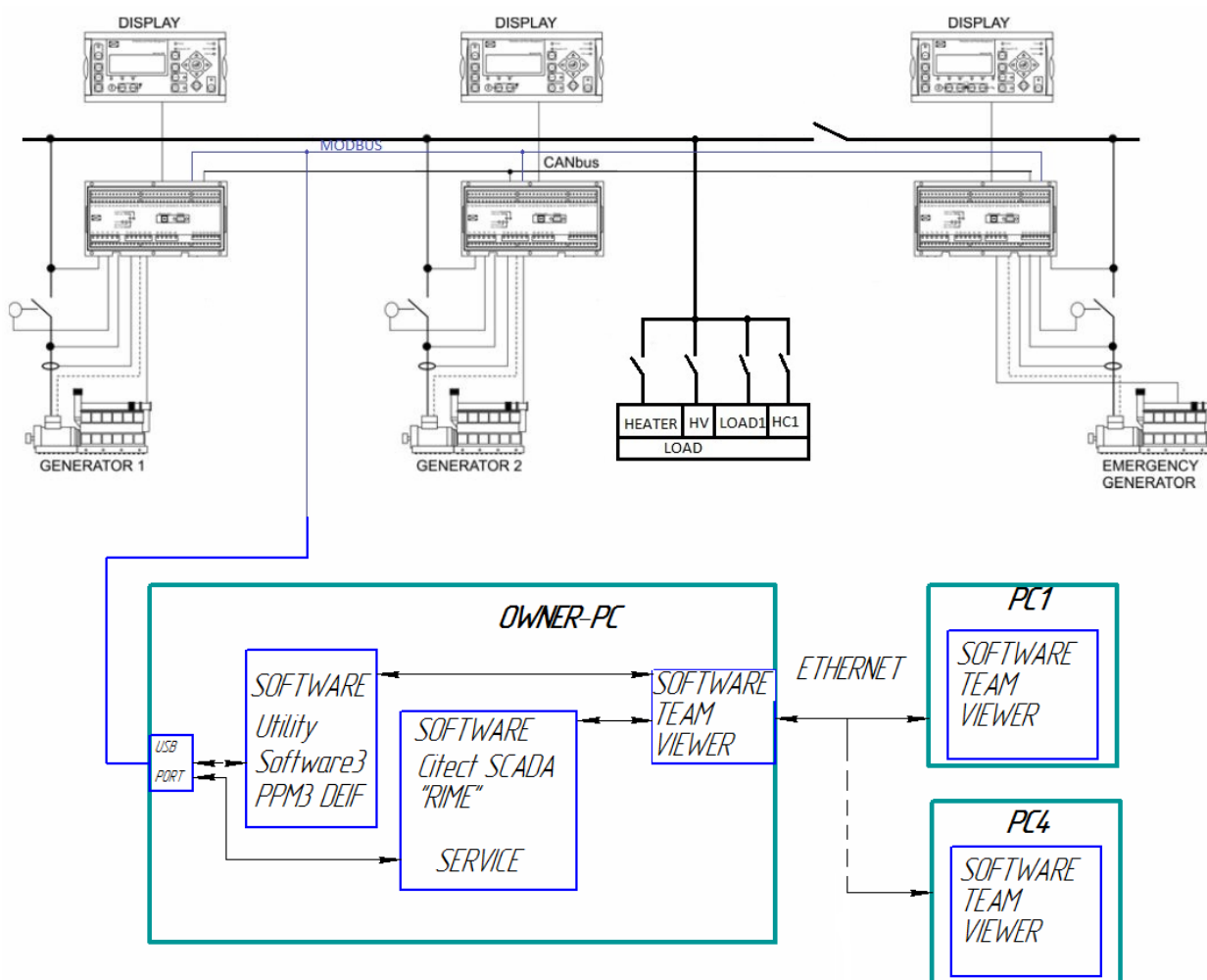


Рис. 6.16, а. Загальна схема фізичної моделі і видаленої конфігурації контролерів основного обладнання САЕЕС

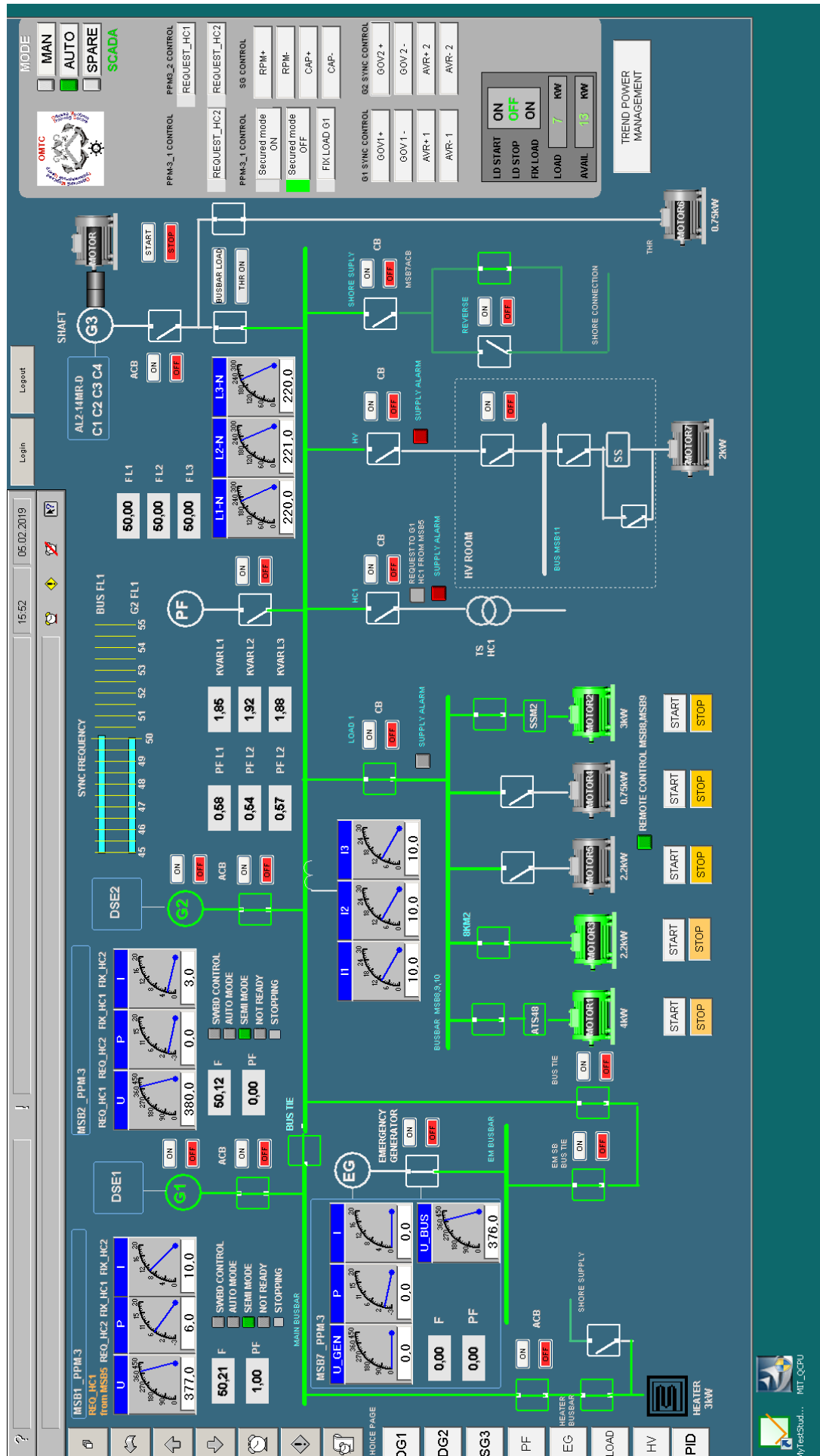


Рис. 6.16, б. Зображення SCADA Expert Vijeo Citect V7.40 на екрані головного комп'ютера

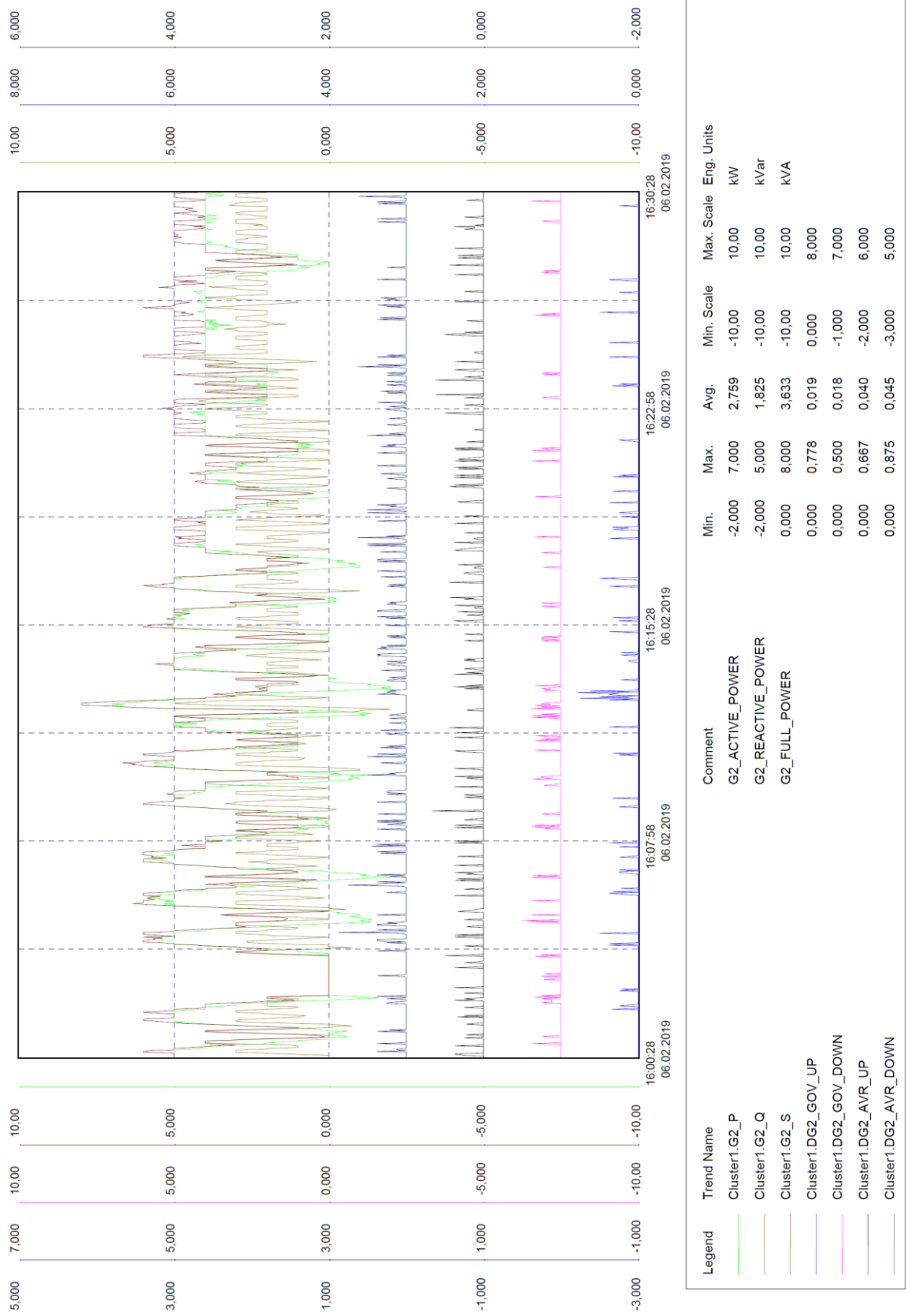


Рис. 6.17. Експериментальні процеси зміни параметрів генератору №2 в умовах збурень під навантаженням

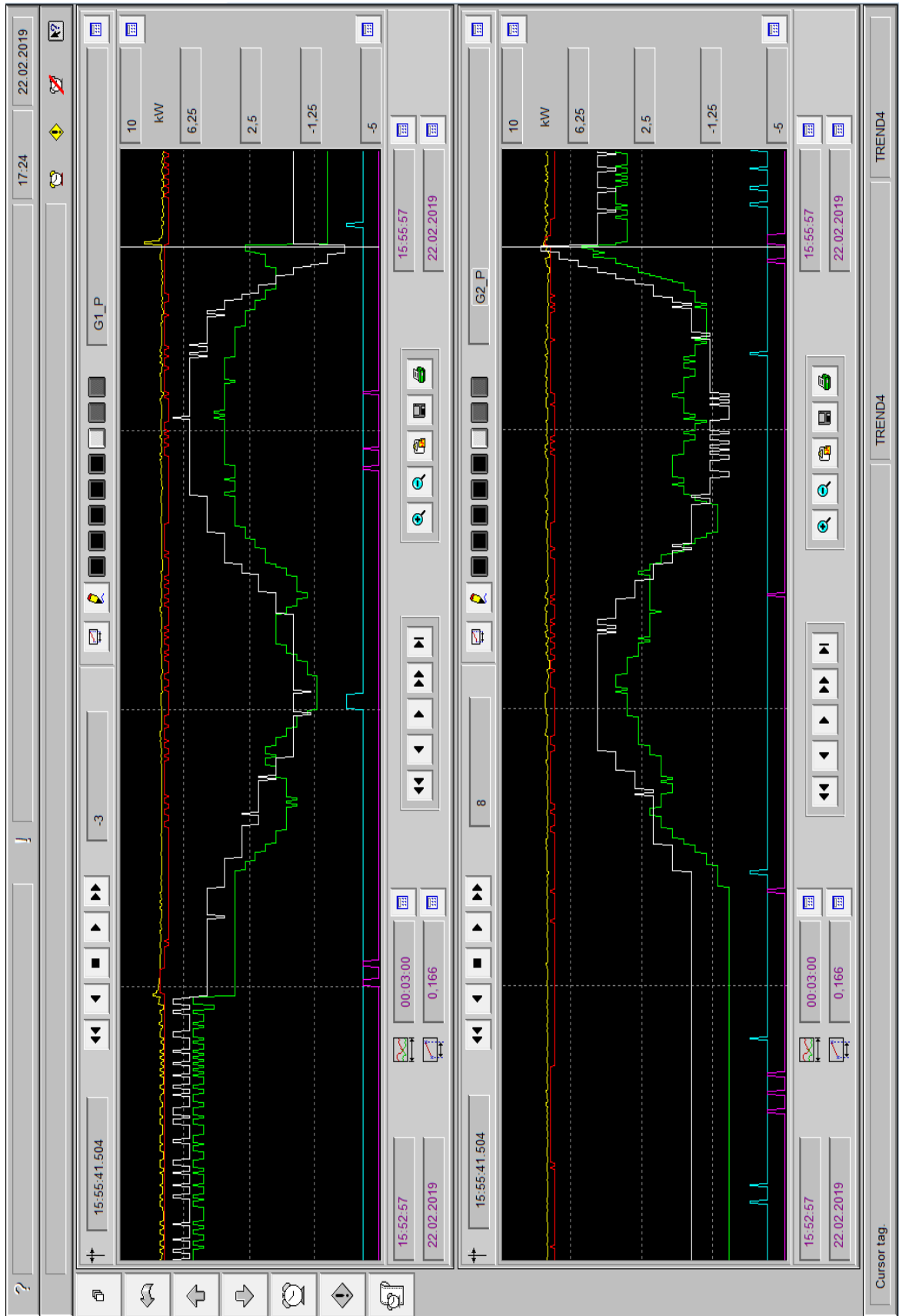


Рис. 6.18. Процес невідлої синхронізації з використанням стандартних алгоритмів управління синхроніза-
тором

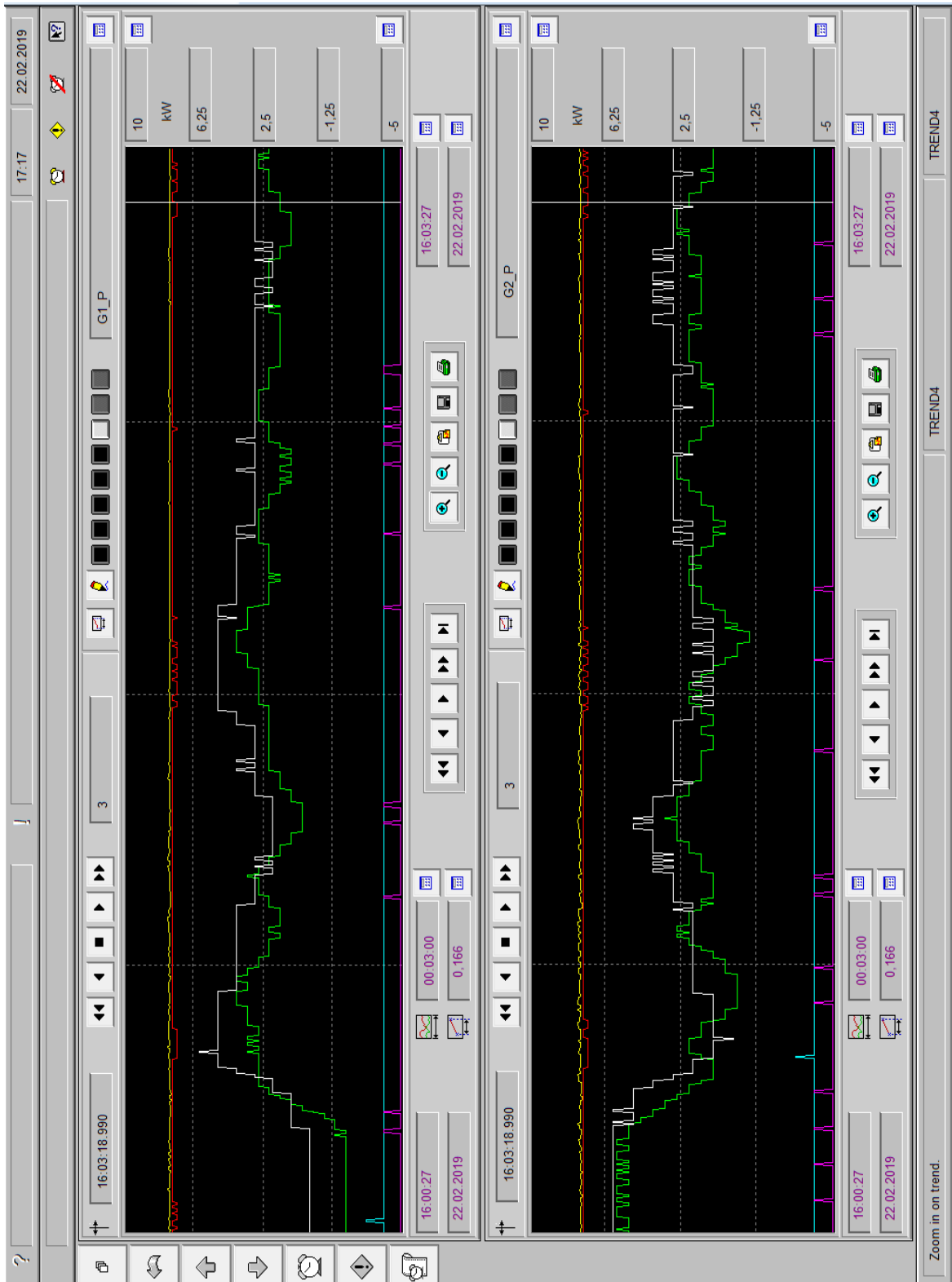


Рис. 6.19. Процес вдалої синхронізації з використанням алгоритмів дуального управління синхронізатором

Експеримент із синхронізації дизель-генераторів в умовах стохастичних збурень проводився з використанням змінного навантаження СЕЕС. Змінення навантаження відбувалось за випадковим законом шляхом керування частотою та моментом двигунів змінного струму, що використовуються у якості споживачів ФМ САЕЕС.

Експериментальні параметри роботи генератору № 2 в умовах збурень під навантаженням наведені на рис. 6.17.

Процес невдалої синхронізації з використанням стандартних алгоритмів управління синхронізатором, реалізованим у контроллерах DEIF PPM-3 наведено на рисунку 6.18, на якому видно, що одразу після включення у паралель генератору №2 система стає нестійкою (коливання навантаження: повного - білий графік; активного - зелений графік) та через короткий проміжок часу захист відключає генератор № 1 від шин ГРЩ.

Застосування удосконалених алгоритмів дуального управління [281] синхронізацією (з використанням запропонованої методики визначення моменту включення генераторних автоматів) при стохастичній постановці завдання синхронізації дозволили досягти ефективної вдалої синхронізації та стійкої паралельної роботи (рис. 6.19) дизель-генераторів навіть в умовах збурень.

Висновки до розділу 6

Шостий розділ присвячений синтезу принципів побудови ефективного управління процесами синхронізації генераторних агрегатів (ГА), що знаходяться у складі розподілених МП-систем управління складних СТС і К.

1. Поставлені завдання синхронізації ГА, побудовані моделі процесів їх баз даних і визначені основні можливі конфігурації систем управління. На основі використання результатних функцій запропоновано опис моделей основних перетворювачів на базі використання принципу відносного руху об'єктів. На прикладі суднових ГА, проведено аналіз функціонування елементів

управління складних СТС і К, запропоновано використання інтегральних критеріїв оптимізації і принципів дуального управління.

2. Показані практичні способи розв'язку завдань управління синхронізацією ГА і визначені основні етапи створення системи управління: а) формалізація сукупності завдань проектування відповідно до техніко-ергатичних і ергономічних вимог до МП-системи управління СЕЕУ; б) синтез вихідної логіко-математичної моделі розроблювальної МП системи, опис сукупності характеристик, функцій якості системи; в) вибір методів дослідження і аналіз логіко-математичної моделі відповідно до поставленого завдання синхронізації; г) розробка способів розв'язку завдань управління і синтезу системи функціональних алгоритмів (визначення складу і кількості операцій, операндів і констант, припустимого часу обчислень, обсягу вхідних параметрів і максимальних помилок їх виміру, характеру обміну даними із зовнішніми пристроями); д) випробування і налагодження у процесі спільної роботи апаратної і програмної частин.

3. Розв'язано задачу швидкодіючого управління частотою синхронізованих ГА на основі принципів припасування. Це дозволило визначити з упередженням часу моменти включення ГА при детермінованій і стохастичній постановці завдання синхронізації. Наведені результати експериментальних досліджень процесів синхронізації ГА і доведена ефективність запропонованого управління ГА.

4. Описано критерії оптимізації при дуальному управлінні процесом синхронізації ГА. Зв'язано закон управління, який задовільняє умові екстремуму, що є показником якості (показником досяжності поставленої мети) і враховує вимоги обмеження керуючих впливів, якості електроенергії, а також можливі зміни технічних характеристик об'єктів синхронізації у процесі експлуатації. Розглянуто розроблювальну систему у класі адаптивних систем управління із відповідною декомпозицією елементів системи. Завдання синхронізації поділені на завдання швидкодії і завдання управління у затребуваних умовах.

5. Побудовані основні моделі управління процесу синхронізації ГА, моделі бази даних і конфігурації системи управління, описано моделі основних перетворювачів з використанням результатних функцій та проведено детальний аналіз основних елементів системи управління на базі принципу відносного руху об'єктів.

6. Запропоновано використання стохастичного підходу при вирішенні завдань синхронізації, що дозволило досліджувати процес синхронізації при русі об'єкту синхронізму по заданій траєкторії зі стохастическими флуктуаціями щодо його завдання під впливом зовнішніх факторів. При визначенні критеріїв оптимізації при дуальному управлінні процесом синхронізації виділено три види критеріїв: для завдань швидкодії; для завдань управління у заданий час і для завдань управління у заданих умовах. Побудована узагальнена універсальна структура управління процесом синхронізації ГА, наведені практичні способи розв'язку завдань управління синхронізацією, показано розв'язок завдання оптимального управління припасуванням частоти синхронізованого об'єкта. Наведені ілюстрації методу дуального управління підгонкою частоти, визначення часових характеристик підгонки частоти, визначення моменту включення генераторних автоматів при детермінованій постановці завдання синхронізації, характеристики випадкового процесу і алгоритм їх визначення, визначення моменту включення генераторних автоматів при стохастичній постановці завдання синхронізації. Наведена процедура визначення і організації прогнозу параметрів синхронізації.

6. Запропонована і створена фізична модель (ФМ) САЕЕС, наведені результати експериментів зі синхронізації генераторних агрегатів у різних умовах. Приведена функціональна схема ФМ САЕЕС, функціональна схема електромеханічного модуля з МП-управлінням навантаженням САЕЕС, загальна схема мереж управління і комунікацій, блок-схема задіяних у експерименті елементів ФМ, загальна схема фізичної моделі і видаленої конфігурації контролерів основного обладнання САЕЕС. У експерименті використана SCADA

Expert Vijeo Citect V7.40, структура якої наведена на екрані головного комп'ютера.

7. Наведені експериментально отримані процеси зміни параметрів генераторного агрегату в умовах збурень під динамічним навантаженням, показані процеси невдалої їх синхронізації з використанням стандартних алгоритмів управління синхронізатором і процеси вдалої синхронізації ГА - з використанням запропонованих алгоритмів дуального управління синхронізатором, що підтверджує достовірність основних отриманих наукових результатів.

РОЗДІЛ 7. УДОСКОНАЛЕННЯ УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ І КОМПЛЕКСАМИ МОРСЬКИХ СУДЕН ПРИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В УМОВАХ ЗБУРЕНЬ ПРИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУРСУ, СТЕЖЕННІ І МАНЕВРУВАННІ

7.1. Особливості експлуатації систем стабілізації курсу морських суден в умовах збурень

Необхідність підвищення безпеки [282-285] мореплавства та експлуатаційних характеристик морських суден призвела до створення різних САУ їх курсу [287-292]. При цьому САУ курсу (САУК) сучасного морського судна повинна відповідати міжнародним вимогам (*IMO Res. A.342 (IX)*, *IMO Res. MSC. 64 (67) Annex 3*, *IMO Res. A694 (17)*, *IMO Res. A. 822 (19)* і *ISO11674 (2006) / 16329 (2003) for High Speed Crafts, IEC 62065 Track Control System*). Саме це формує, також, вимоги національних Регістрів до автостерна морських суден. Суттєвий внесок у розробку методів управління морськими суднами внесли *Yorger D. R.*, *Egeland O.*, *Strand J. P.*, *Nguyen T. D.*, *Nomoto K.*, *Armada M. A.*, *Fossen T. I.*, *Balchen J. G.*, *G. Van Leeuwen*, *Bech M.*, *Åström K. J.*, *Lewandowski E. M.*, *Norrbin N. H.*, *Balchen J. G.*, *Nielsen U. D.*, *Sorensen A.J.*, *Healey L.*, *J. van Amerongen*, *Källström C. G.*, Басін А. М., Юдін Ю. І., Тетюєв Б. А., Першиц Р. Я. та інші. У працях названих і багатьох інших дослідників показано, що автостерно повинно мати можливості налаштування до змін динамічних характеристик суден при змінах погодних умов, змінюванні завантаження судна [4, 9, 20, 36, 290-295]. Автостерно повинно автоматично утримати судно на заданому курсі із точністю, при якій середнє значення курсу може відрізнитися від заданого курсу лише на заздалегідь визначений кут та при тій швидкості руху, що забезпечує стійку керованість судном. Максимальна амплітуда рискання не повинна перевищувати допустиму при ручному управлінні. Автостерно повинно забезпечувати автоматичне утримання судна на заданому курсі з мінімальним навантаженням на стернову машину (СМ) за величиною і кількістю перекладань стерна.

Безумовно, розробка сучасних АСУ, що забезпечують рух судна на заданій траєкторії, утримання на заданому курсі в умовах зміни погодних факторів, обмеженості маневру і інтенсивності руху, автоматичного корегування обраного шляху і швидкості руху - актуальна науково-технічна задача підвищення ефективності експлуатації такою складною технічною системою, як сучасне морське судно [57, 100, 295-298].

Головними завданнями автостерна морського судна є: автоматичне утримання на заданому курсі судна, забезпечення переходу судна з курсу на курс із заданою кутовою швидкістю чи радіусом, управління сумісно із убудованою електронно-картографічною навігаційно-інформаційною системою (ЕКНІС) рухом судна вздовж заданої траєкторії, тощо.

У [4, 9, 20, 36, 282, 286, 290, 295, 298] підкреслюється, що у якості основного впливу, яке діє на курс судна, є хитавиця. При цьому виділяються дві основні складові збурення: постійне, що повільно змінюється та викликає знос і кут дрейфу, і періодичне, наслідком якого є нишпорення [295-300]. Також демонструється дія вітрового впливу (швидкості і напрямку вітру) на процес управління судном у режимі стабілізації його курсу [299, 300]. Спрощена модель такої системи представлена на рис. 7.1.

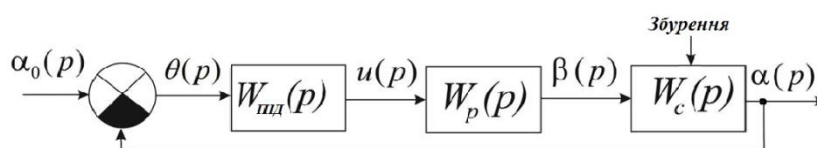


Рис.7.1.Спрощена структурна схема САУК судна

На рис. 7.1 прийняті наступні умовні позначення: $\alpha_0(p)$ - сигнал завдання; $u(p)$ - вихідний сигнал ПІД-регулятора; $\beta(p)$ - кут перекладки стерна; $\alpha(p)$ - курс судна; $\theta(p) = \alpha_0(p) - \alpha(p)$ - сигнал помилки; $W_{\text{пид}}(p)$ - ПФ ПІД регулятора; $W_p(p)$ - ПФ стернової машини; $W_c(p)$ -

ПФ функція судна. ПФ стернового пристрою $W_p(p)$, судна $W_c(p)$ і ПІД регулятора $W_{\text{пид}}(p)$ мають вигляд [4, 9, 20, 36, 100]:

$$W_{\text{пид}}(p) = k_n + \frac{k_u}{p} + k_d p; \quad W_p(p) = \frac{k_p}{T_p p + 1}; \quad W_c(p) = \frac{k_c}{T_c p^2 + p}, \quad (7.1)$$

де k_p , T_p , k_c , T_c - коефіцієнти передачі і стали часу стернового пристрою і судна відповідно; k_n , k_u , k_d - пропорційний, інтегральний і диференціальний коефіцієнти ПІД регулятора.

Зрозуміло, що у наведеній на рис. 7.1 структурній схемі знаходження ефективного процесу стабілізації зводиться до визначення "оптимальних" значень коефіцієнтів k_n , k_u , k_d . Але структура сучасних автостернових (NAVPILOT xxx Series фірми "Furuno", AP3xxx компанії "Navis Engineering OY", PT500D компанії "Yokogawa", NautoPilot 5000, NP2025PLUS компанії "Raytheon", PilotStar D, Saura SA-10, Navitron та ін.) дозволяє гнучке переналаштування режимів та враховувати, за допомогою різних датчиків, зовнішні впливи.

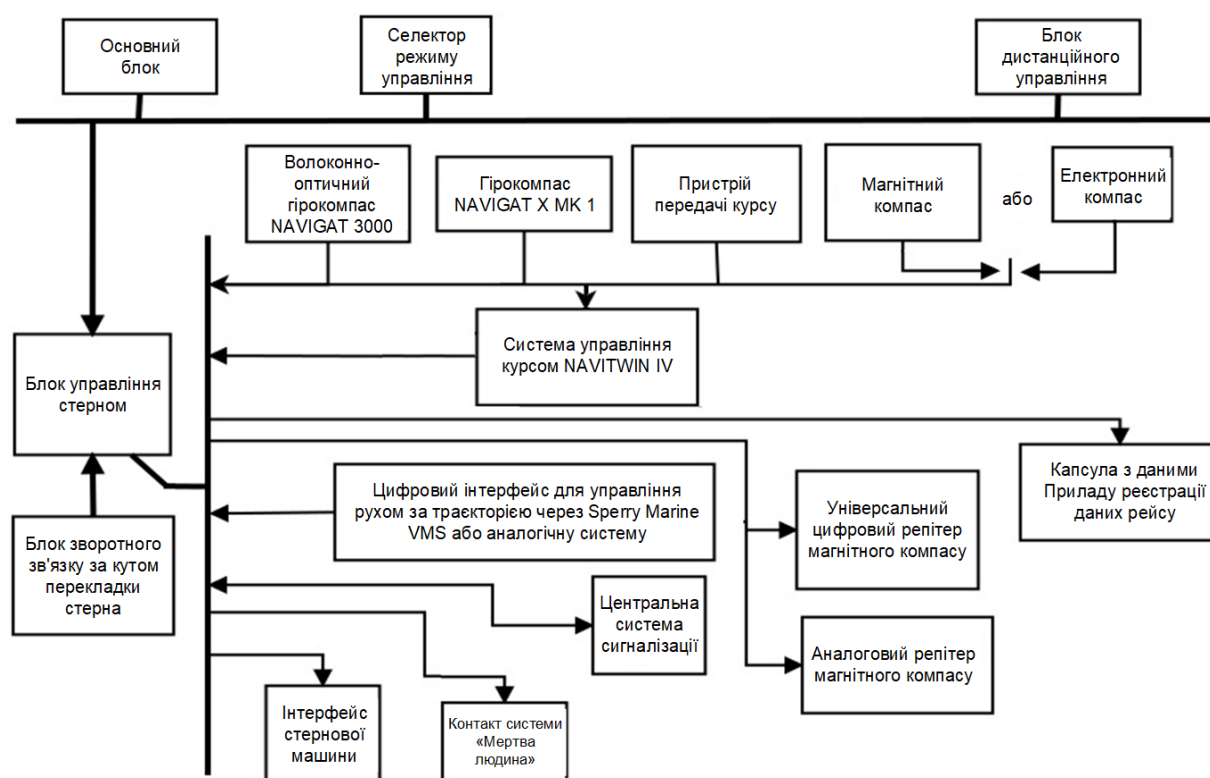


Рис. 7.2. Структурна схема автостерна типу "NAVPILOT 4000"

Наприклад, на рис. 7.2 показана структурна схема сучасного автостерна типу "NAVPILOT 4000".

Більшість відомих САУК [294-300] використає у своєму складі системи, засновані на принципі стабілізації "за відхиленням" та алгоритми ПД-регулювання. До основних недоліків САУК за відхиленням відносяться принципова складність одночасного досягнення необхідної точності управління, стійкості і швидкодії. Тому, при синтезі САУК, доводиться приймати компромісні рішення: обирати змінювані параметри регулятора так, щоб забезпечити необхідну точність підтримки курсу при необхідному запасі стійкості.

Виходячи з перерахованих недоліків і з огляду на сучасний етап розвитку самоналагоджувальних САУК, можна зробити висновок, що підвищення ефективності їх роботи шляхом переналаштування коефіцієнтів ПД-регулятора фактично вичерпано. Необхідність відчутного підвищення ефективності САУ у режимі стабілізації судна на курсі вимагає перегляду законів управління і структур існуючих систем.

Один спосіб підвищення ефективності гвинтостернового комплексу судна - введення у існуючі САУК судна додаткового каналу уп-

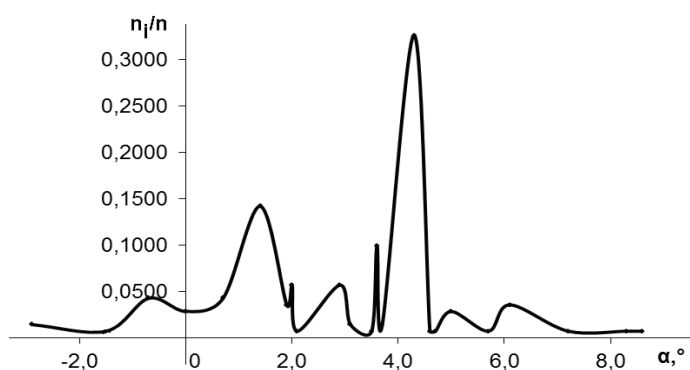


Рис.7.3. Експериментальна діаграма кладок стерна (курс 119°; хитавиця 6 балів; вітер 311°-331°, 11,9 м/сек; середня швидкість 10 вузлів)

равління - за збуренням (див. § 7.5). Оскільки безпосередньо вимірювати збурювальні впливи майже неможливо, тому одним із способів визначення впливу діючих на судно збурень, може служити прогнозує (упереджена) оцінки пара-

метрів сигналу управління у режимі стабілізації курсу судна, наприклад, при ПД алгоритмі регулювання (або іншому алгоритмі) за допомогою технічно реалізованих, доступних вимірювань [9, 21, 34, 36].

Це припущення підтверджує осцилограма кладок СМ т/х “Парфентій Гречаний” при роботі САУК у режимі “Автомат” (див. рис. 7.3), де позначено α - кут кладки стерна, град; n_i/n - відносна кількість кладок n на певний кут. При аналізі цієї діаграми, визначені три основні гармоніки кладок стерна у режимі стабілізації курсу. Перша гармоніка має період 54 с і амплітуду 4,5 °, друга - період 57 с і амплітуду 3,5 °, третя - період 73 с і амплітуду -1,1 °. Теоретично, ці дані дозволяють сформувати сигнал управління з упередженням (до відхилення курсу), що у комбінації із традиційним каналом за відхиленням, у цілому, підвищить якість процесу утримання судна на курсі.

Підкреслимо, що функціонування будь-якої САУК ґрунтується на використанні математичної моделі (ММ) динаміки стернового управління судном [301-305]. Безумовно, наведена на рис. 7.1 схема дуже спрощена і така (феноменологічна) ММ САУК дозволяє встановити тільки загальний характер динаміки системи. Але з рис. 7.1 можна визначити найголовніші складові ММ: *а)* об'єкту управління (судна); *б)* стернового пристрою (стернової машини СМ); *в)* алгоритму управління (регулятор, контролер). Найзручніше це зробити за допомогою апарату передаточних функцій. Ясно, що для створення більш ефективної АСУК судна, будь-яким чином необхідно урахувати вітро-хвильові збурення, що діють на його корпус.

Таким чином, що природно, чим точніше визначені структура і параметри результуючої ММ стернового управління судном, чим точніше вона буде описувати фізичні властивості судна, умови його руху і основні елементи системи, тим більш ефективнішу можна синтезувати САУК, тим меншими будуть підсумкові втрати у енергетичній установці судна, тим більше знизяться динамічні навантаження на механізми СМ, знизяться шуми і вібрації корпусу судна.

Саме для того, щоб синтезувати більш ефективну і перспективну для подальшого розвитку систему управління, розглянемо побудову ММ основних визначених елементів САУ курсом судна.

7.2. Побудова математичних моделей динаміки морських суден на основі експериментальних досліджень

Моделюванню процесів маневрування судна присвячена велика кількість робіт вітчизняних і зарубіжних авторів [6, 294-298]. Існують як лінійні ММ, що передбачають управління курсом при постійній середній швидкості, так і нелінійні ММ, що дозволяють розрахувати динаміку судна у широкому діапазоні параметрів руху [3-6, 294-298, 306-310].

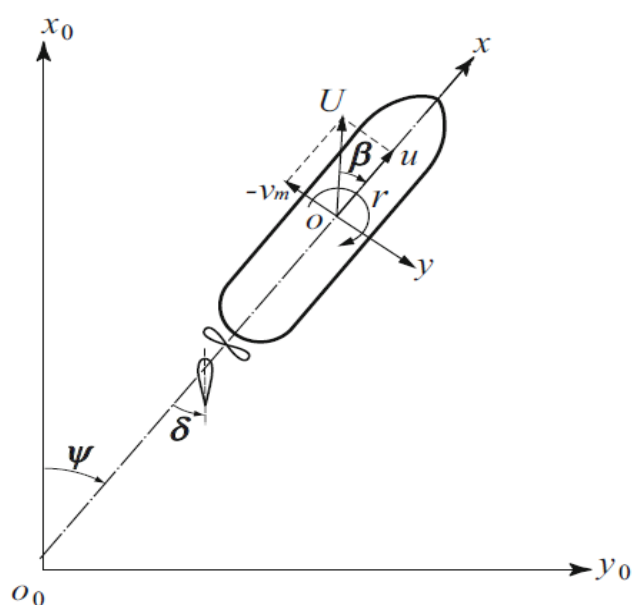


Рис. 7.4. Системи координат при моделюванні руху судна

У переважній більшості випадків зустрічаються два варіанти опису ММ маневрування у трьох ступенях свободи. У першому випадку, це система рівнянь для поздовжньої і поперечної складової швидкості поступального руху і швидкості обертання щодо вертикальної вісі [294-298]. У другому випадку, це система рівнянь для швидкості поступального руху, куту дрейфу і швидкості

обертання щодо вертикальної вісі [295-297, 306-310].

З точки зору процесу створення ММ маневрування з урахуванням дії сил різної природи, таких як вітро-хвильові навантаження, доцільно будувати ММ судна з розподілом швидкостей - на основі прив'язаної до фіксованій точці судна системи координат. Сили і моменти, що діють на судно, можна розрахувати на основі добре апробованих методів [294-310].

У більшості випадків використання узагальнених для типового ряду суден формул призводить до істотних погіршень у екстраполяційних розрахунках, які застосовуються для оцінки динаміки судна, оцінки безпеки мореплавання.

Тому, розрахувавши на попередній стадії моделювання коефіцієнти ММ, слід їх відкоригувати за наявними експериментальними даними, тобто провести верифікацію моделі. На спрощеному прикладі покажемо пропонуваній алгоритм уточнення параметрів ММ динаміки судна, заснований на випробуваннях контейнеровозу класу *ULSC*.

7.2.1. Модель процесу маневрування судна

Система рівнянь, що описує рух судна на площині [294-310]:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x)\dot{u}_G - (m + m_y)v_G r_G &= X \\ (m + m_y)\dot{v}_G + (m + m_x)u_G r_G &= Y \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r}_G &= N - x_G Y \end{aligned} \right\}$$

де m - водотоннажність судна; m_x, m_y - приєднані маси; $I_{kk}, I_{zz}, J_{kk}, J_{zz}$ - моменти інерції та приєднані моменти інерції, відповідно; u_G, v_G, p_G, r_G - поздовжня і поперечна складові поступальної швидкості і кутові швидкості щодо поперечної і вертикальної вісей центра ваги судна, відповідно; X, Y, K, N - гідродинамічні сили і моменти, що діють на судно.

Гідродинамічні сили і моменти представимо рівняннями [311-315]:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_R + X_P \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_P \\ N &= N_H + N_R + N_P \end{aligned} \right\}$$

де підрядкові символи позначають H – корпус; R – стерно; P – гвинт; W – вітер; BT – носовий підстерновий пристрій.

Сили і моменти, які виражають рух на площині, приймемо у відомій формі Йошимури [312, 313]. Сили і момент опору води (X_H, Y_H, N_H), спільно з силами інерції, виражаються у вигляді системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} X_H + m_y v_g r_g &= \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \times \left\{ X'_0 + X'_{\beta\beta} \beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' + (X'_{rr} - x'_G m'_y) r'^2 + X'_{\beta\beta\beta\beta} \beta^4 \right\} \\ Y_H - m_x u_g r_g &= \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \times \left\{ Y'_\beta \beta + (Y'_r - m'_x) r' + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta rr} \beta r'^2 + Y'_{rrr} r'^3 \right\} \\ N_H &= \left(\frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \right) \times \left\{ N'_\beta \beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta rr} \beta r'^2 + N'_{rrr} r'^3 \right\} \end{aligned} \right\}$$

де ρ - щільність води, β - кут дрейфу (умовно позитивний), у напрямку на борт, що ліворуч; $X_0, X_{\beta\beta}, X_{\beta\beta\beta\beta}, X_{rr}, X_{\beta r}, Y_\beta, Y_{\beta\beta\beta}, Y_r, Y_{rrr}, Y_{\beta\beta r}, Y_{\beta rr}, N_\beta, N_{\beta\beta\beta}, N_r, N_{rrr}, N_{\beta\beta r}, N_{\beta rr}$ - коефіцієнти сил опору.

Силу упору, створювану гвинтом, можна розрахувати за взаємопов'язаними формулами:

$$\begin{aligned} T &= \rho \cdot n_p^2 \cdot D_p^4 \cdot K_T(J_p); K_T(J_p) = k_0 + k_1 \cdot J_p + k_2 \cdot J_p^2; \\ X_p &= (1 - t_p) \cdot T; J_p = \frac{u(1 - w_p)}{n_p D_p}, \end{aligned} \quad (7.2)$$

де T - упор гвинта, t_p - коефіцієнт зменшення упору, n_p - частота обертання гвинта, D_p - діаметр гвинта, K_T - коефіцієнт упору, J_p - ковзання гвинта, w_p - коефіцієнт впливу корпусу.

Сили і момент, створювані стерном, визначаються системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R) F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H) F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \end{aligned} \right\}$$

де F_N - нормальна сила, створювана на стерні; t_R, a_H, x_H - коефіцієнти, що відображають гідродинамічну взаємодію корпусу, гвинта і стерна; x_R - відстань від площини мідель-шпангоуту до балеру. Нормальна сила визначається виразом: $F_N = \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 f_a \sin a_R$, де A_R - площа пера стерна, U_R - швидкість потоку води на пере стерна, f_a - підйомний коефіцієнт, a_R - кут скосу потоку води на стерні.

Коефіцієнти у наведених рівняннях визначаються з довідників, або з бази даних випробувань судна-аналога. У будь-якому випадку необхідна подальша верифікація отриманої ММ на основі випробувань конкретного суд-

на, тобто на основі порівняння результатів моделювання з експериментом і подальшим коригуванням коефіцієнтів рівнянь.

7.2.2. Моделювання процесу маневрування з попередньо визначеними значеннями коефіцієнтів

Типовими експериментальними дослідженнями динамічних властивостей суден є маневри - "циркуляція", "спіраль", "зігзаг", активне і пасивне гальмування. Використані, у подальшому, експериментальні дані отримані зі звіту про випробування контейнеровозу "Maersk Sirac" класу ULSC, 10 000 TEU. У таблиці 7.1 наведені основні дані цього судна [316, 317].

Таблиця 7.1 - Характеристики судна "Maersk Sirac"

Параметр	Значення
Довжина найбільша, м	300
Довжина між перпендикулярами, L , м	287
Ширина, B , м	48.2
Осадка (середня /максимальна) у вантажу, d , м	12,5/15,0
Осадка носом на випробуваннях, м	4,02
Осадка кормою на випробуваннях, м	10,16
Діаметр гвинта, D_p , м	9,7
Коефіцієнт повноти (у баласті), C_b	0,6044
Площа змоченої поверхні, Ω , м ²	11656
Коефіцієнт площині мідель-шпангоуту, C_M	0,9735
Площа пера стерна, A_R , м ²	78,95

Маневрені випробування проводилися для цього судна у баласті з диферентом 6,14 м та середньої осадкою 7,09 м. При циркуляції частота обертання гвинта змінювалася від 54 до 83 об/хв. Підкреслимо, що середня реальна експлуатаційна осадка судна більша (приблизно удвічі) при практично нульовому диференті.

Етап моделювання з попередньо прийнятими коефіцієнтами (розрахованими за відомими і екстрапольованими для контейнеровозу "Maersk Sirac" [317] емпіричними формулами) привів до значних розбіжностей із маневреними випробуваннями. Для уточнення коефіцієнтів ММ (маневр "циркуля-

ція") доцільно використати характеристики розгону і гальмування судна [7, 8, 316, 317].

На першому етапі верифікації ММ динаміки судна визначимо для яких параметрів необхідно оцінювати точність отриманих результатів і яку слід прийняти цільову функцію. У даному випадку, цільову функцію Z доцільно розбити на динамічну Z_D і кінематичну Z_K складові. Для маневру "циркуляція" завжди вказується швидкість, курс і координати судна, а також висушний тактичний діаметр циркуляції:

$$Z_D = w_1 \frac{\sum_{n=1}^N |U_{Tn} - U_{Sn}|}{N} + w_2 \frac{\sum_{n=1}^N |r_{Tn} - r_{Sn}|}{N};$$

$$Z_K = w_3 \left(\frac{\max(X_T) - \max(X_S)}{\max(X_T)} + \frac{\max(Y_T) - \max(Y_S)}{\max(Y_T)} \right) + w_4 \frac{\sum_{n=1}^N \Delta D}{N \cdot \max(X_T)};$$

$$\Delta D = \sqrt{(X_T - X_S)^2 + (Y_T - Y_S)^2},$$

де ΔD - похибка позиції; w_i - ваговий коефіцієнт; індекс T - дані випробувань; індекс S - дані розрахунків; $\max(X_T)$ - позиція, що характеризує тактичний діаметр циркуляції; $\max(Y_T)$ - позиція, що характеризує висування.

У якості окремої складової цільової функції (ЦФ) для маневру "зігзаг", виділимо похибки 1-го і 2-го кутів зарискування:

$$Z_Z = w_5 \left(\left| \frac{\Delta \psi_1^T - \Delta \psi_1^S}{\Delta \psi_1^T} \right| + \left| \frac{\Delta \psi_2^T - \Delta \psi_2^S}{\Delta \psi_2^T} \right| \right).$$

Похибки дистанції, лінійної і кутової швидкості різного порядку, тому їх нормалізуємо ваговими коефіцієнтами: $w = [1; 180 \cdot 60 / \pi; 2; 1; 0,2]$. Тоді ЦФ буде визначатися сумою трьох складових: $Z = Z_D + Z_K + Z_Z$. Визначені коефіцієнти підлягають уточненню і подальшому корегуванню (змінними є 19 коефіцієнтів, що входять у рівняння сил опору корпусу і сил, що створюються пером стерна):

$$X'_{\beta\beta}, X'_{\beta r}, X'_{rr}, X'_{\beta\beta\beta\beta}, Y'_{\beta}, Y'_{rr}, Y'_{\beta\beta\beta}, Y'_{\beta\beta r}, Y'_{\beta rr}, Y'_{rrr}, N'_{\beta}, N'_{rr}, N'_{\beta\beta\beta}, N'_{\beta\beta r}, N'_{\beta rr}, N'_{rrr}, \varepsilon, \gamma_R, a_h.$$

На рис. 7.5 наведена блок-схема пропонованого алгоритму верифікації ММ динаміки судна. Алгоритм заснований на корегуванні зазначених 19 коефіцієнтів, що входять до складу моделі руху судна.

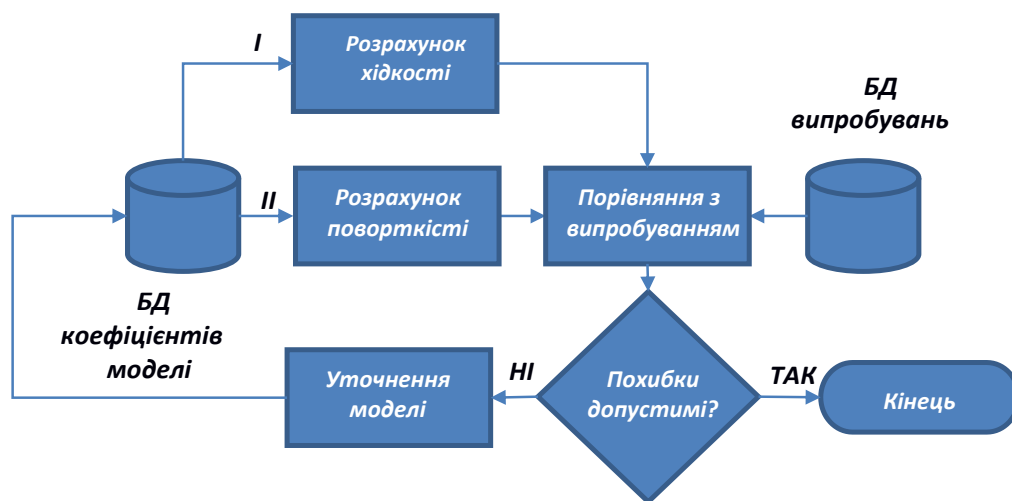


Рис. 7.5. Блок-схема алгоритму верифікації ММ руху судна

Як запропоновано вище, першим етапом є корегування моделі хідкості. Початкові коефіцієнти ММ обираються з бази даних випробувань аналогічних суден, потім проводиться моделювання і порівняння з даними випробувань. Якщо точність результатів моделювання не задовольняє заданим критеріям, проводиться корекція коефіцієнтів.

Пропонується використовувати метод безумовної оптимізації функції декількох змінних (метод деформованого багатогранника Нелдера-Міда). Цей метод не використовує похідні функцій і тому легко адаптується до складних (або з вимірювальними завадами при проведенні експерименту) функцій.

У результаті запропонованої оптимізації, уточнені коефіцієнти ММ вносяться до нової бази даних.

На рисунках 7.6, 7.7 і 7.8, та у табл. 7.2 і 7.3 наведені результати моделювання у першому наближенні і після уточнення коефіцієнтів ММ.

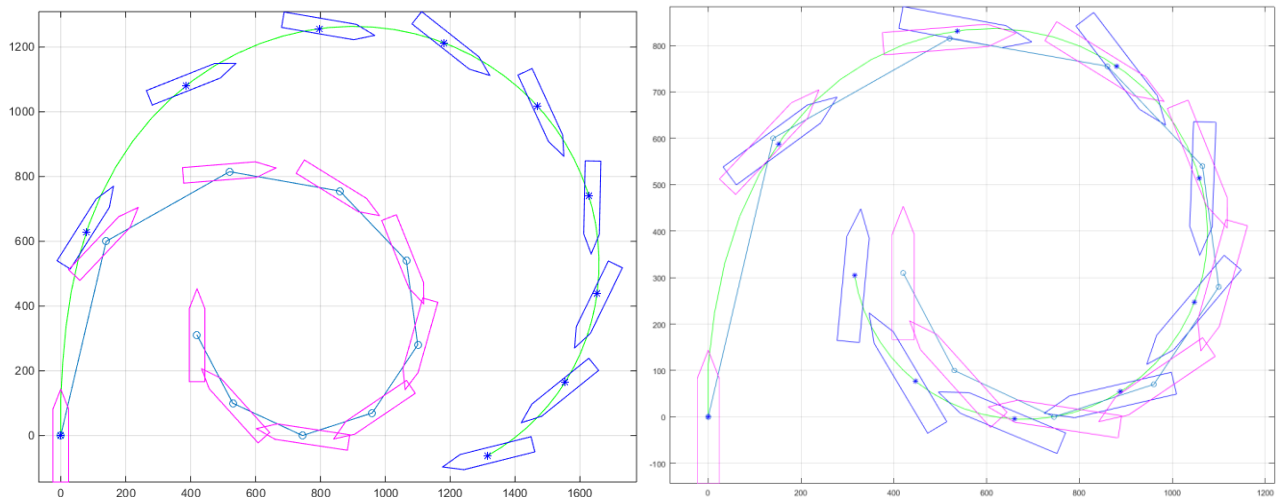


Рис. 7.6. Траєкторії циркуляції на борт, що праворуч перед, та після, верифікації ММ (° – експеримент, * – моделювання)

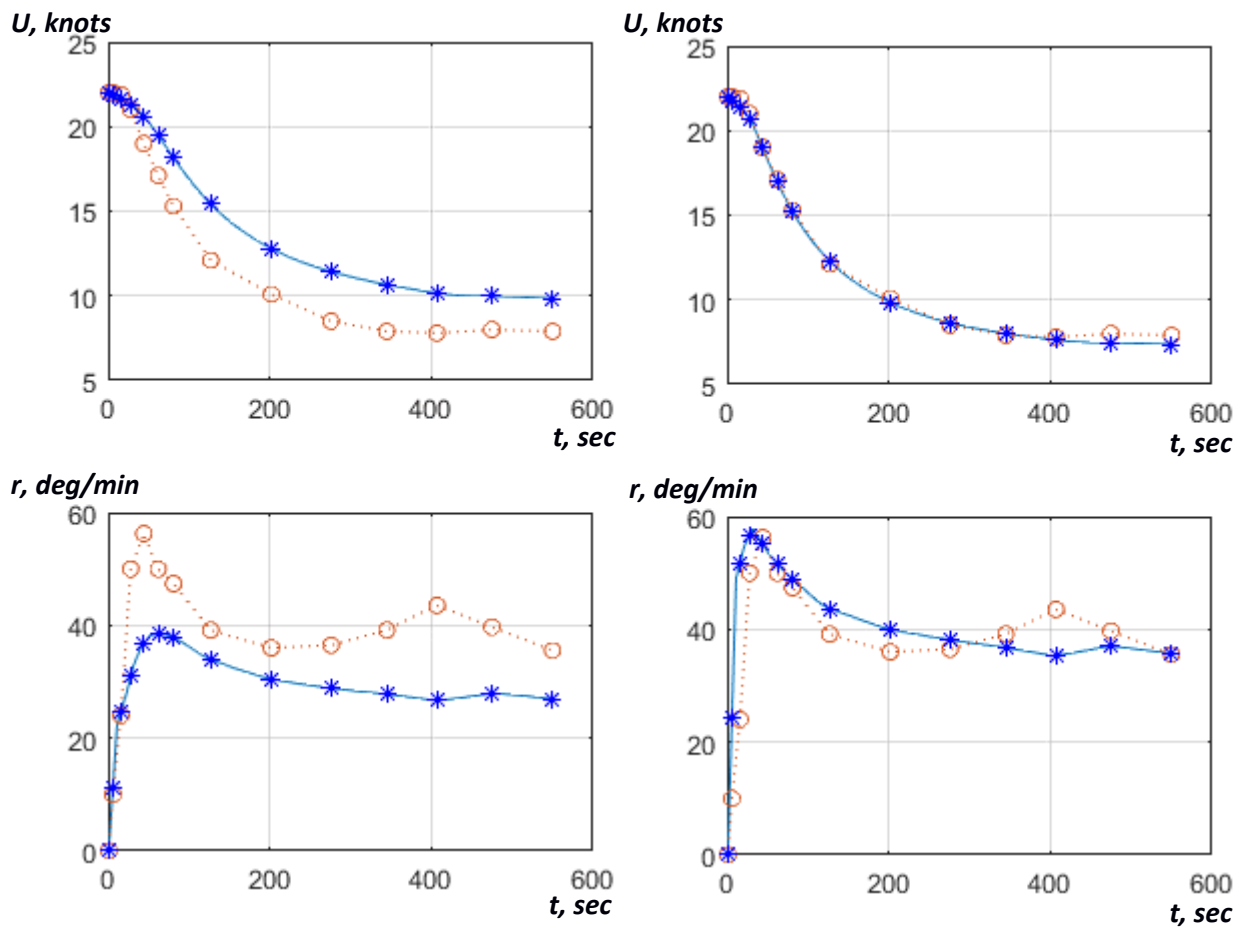


Рис. 7.7. Параметри руху при циркуляції на борт, що праворуч перед, та після верифікації ММ (° – експеримент, * – моделювання)

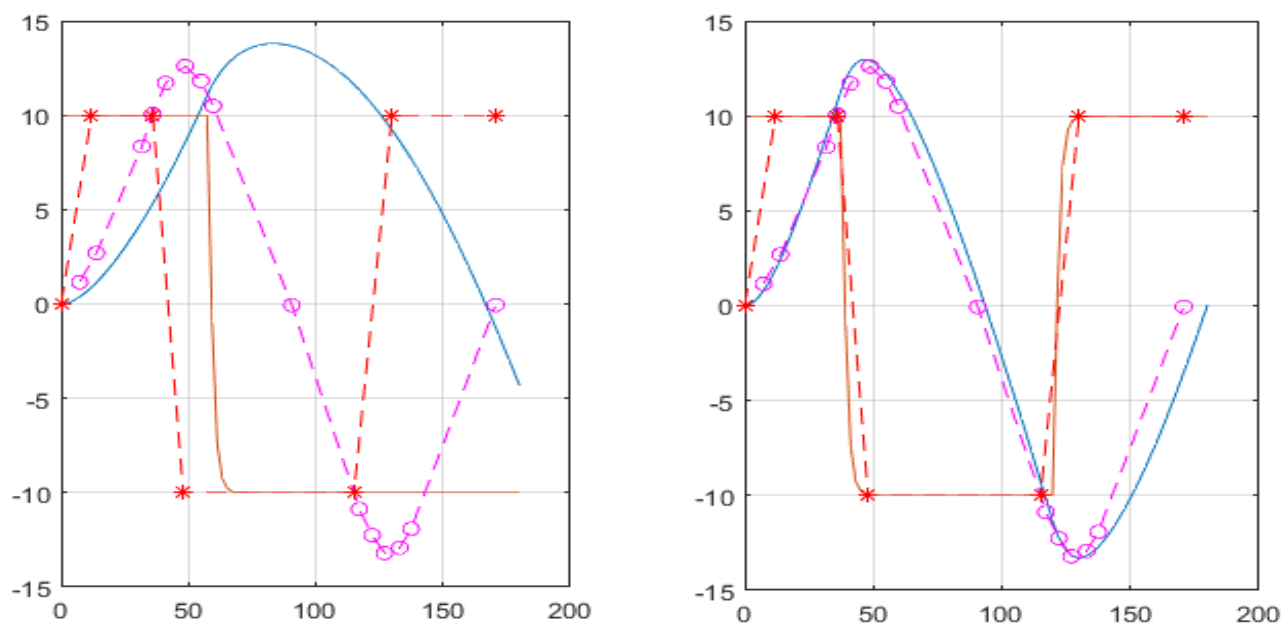


Рис. 7.8. Параметри одержування судна: зігзаг 10/10 до та після верифікації ММ (пунктирна лінія – експеримент, суцільна лінія – моделювання)

Таблиця 7.2 - Уточнення коефіцієнтів ММ

№	Коефіцієнт	Початкові значення	Після корегування	Результуюча похибка, %
1	$X'_{\beta\beta}$	-0,0626	-0,2617	318
2	$X'_{\beta r}$	-0,1149	-0,1531	33
3	X'_{rr}	-0,00068	-0,00069	2
4	$X'_{\beta\beta\beta\beta}$	0,4182	0,47811	14
5	Y'_{β}	0,3099	0,1044	66
6	Y'_r	0,1207	0,1795	49
7	$Y'_{\beta\beta\beta}$	1,5816	2,7160	72
8	$Y'_{\beta\beta r}$	0,6323	0,9423	49
9	$Y'_{\beta rr}$	0,7173	1,3620	90
10	Y'_{rrr}	0,0088	0,001	89
11	N'_{β}	0,0179	0,0087	52
12	N'_r	-0,03025	-0,03	4
13	$N'_{\beta\beta\beta}$	0,2407	0,2259	6
14	$N'_{\beta\beta r}$	-0,6018	-0,6445	7
15	$N'_{\beta rr}$	0,077	0,109	41
16	N'_{rrr}	-0,03	-0,055	79
17	ε	0,902	1344	49
18	γ_R	0,350	0,312	11
19	a_h	0,3674	0,3422	7

Таблиця 7.3 - Порівняння результатів коригування математичної моделі

Параметр	Експериментальні випробування	До верифікації	Після верифікації
Висування, м	830,9	1255	836
Тактичний діаметр циркуляції, м	1164,3	1630	1148,3
1-й кут зарискування, °	2,5	3,8	3,0
2-й кут зарискування, °	3,2	-	3,3
СКП позиції, град ²	-	589,2	49,9
СКП курсу, град ²	-	28,5	10

Як видно, процедура застосування досягнення екстремуму запропонованої ЦФ дозволяє істотно зменшити похибки моделювання і таким чином пропонується проводити верифікацію ММ динаміки інших суден. Отримана ММ добре описує реальні фізичні процеси, що дозволяє її використовувати при синтезі ефективних систем різного призначення при управлінні судном.

7.3. Математичне моделювання елементів систем стабілізації курсу і динамічного позиціонування суден

Відомо, що стрімке зростання морської нафтогазовидобувної галузі обумовлено високим попитом на вуглеводні. Видобуток нафти і газу у морі нерозривно пов'язаний з виконанням технічно складних операцій, багато з яких полягають у взаємодії суден між собою. При цьому, що найчастіше, потрібно нерухомо утримувати судно у фіксованій точці із заданими координатами і курсом. Для виконання завдання утримання судна у заданій позиції використовуються різного типу системи динамічного позиціонування (ДП) [3, 287, 288], що забезпечують автоматичне управління довготою, широтою і курсом судна. Головними критеріями якості роботи систем ДП є точність утримання судна у заданій позиції і безвідмовність, що забезпечують безпеку виконання операцій, пов'язаних з видобутком нафти і газу. Також системи ДП застосовуються і у певного типу кораблях, багатоцільових суднах та суднах подвійного призначення (ПП).

Системи ДП суден поділені на класи ДП1, ДП2 і ДП3. Клас судна визначає не тільки ступінь резервування всіх компонентів системи, включаючи датчики, навігаційні системи визначення позиції, джерела електричної енергії, рушійні і підстернові пристрої, але і МП-системи управління. Збільшення резервування компонентів на таких суднах веде до істотного зростання витрат на їх проектування, будівництво і обслуговування, тому судновласники завжди знаходяться у пошуку компромісу між безвідмовністю, вартістю і функціональними можливостями таких суден. Але навіть на суднах з підвищеним резервуванням компонентів відбуваються відмови, що призводять до втрати позиції і аварій з важкими, а іноді і катастрофічними наслідками. Ці відмови пов'язані, у тому числі і з застосованими алгоритмами управління судном, які засновані на ММ динаміки конкретного судна.

З урахуванням сказаного, проблема ефективного управління ДП суден, проблема відмов елементів системи ДП суден є важливою і актуальною, і вимагає на першому етапі аналізу аварійних ситуацій при втраті позиції з метою виявлення найбільш вразливих компонентів ДП системи, уточнення ММ динаміки судна.

Відомо, що більшість випадків втрати позиції судном відбувається через відмови у СЕУ, до якої відносяться головні і допоміжні механізми. Серед елементів СЕУ виділимо СЕЕС і гвинто-стерновий комплекс (ГСК) [301-305], які є основними силовими елементами системи ДП. Відмови у СЕЕС, особливо на суднах класу ДП2 і ДП3, де передбачено резервування генераторних агрегатів і розподільних щитів, призводять, як правило, до втрати запасу (резерву) потужності і, як наслідок, частини активного упору. Це призводить, при невдалому розташуванні судна (лагом до основних збурень), до повільного “сповзання” із заданої позиції і не носить раптовий характер.

Найбільший інтерес представляють відмови у ГСК, які тягнуть за собою втрату однієї або декількох установок, що створюють упор. Іноді такі відмови призводять до створення неконтрольованої ДП системою упору, що призводить до раптової, непередбачуваної у напрямку, втрати судном пози-

ції. Наприклад, моделювання системи механізму зміни кроку гвинта ГСК присвячені роботи [3, 301-305]. У цих і інших працях описані різні експериментальні установки, що відображають процеси роботи ГСК, надано пропозиції щодо підвищення ефективності окремих вузлів ГСК. Аналіз типових відмов при управлінні суднами у ДП з системами ГСК показує необхідність детального вивчення механізму зміни кроку з метою проведення підвищення надійності роботи ГСК, і що не менш важливо, удосконалення ММ динаміки судна, що знаходиться у режимі ДП.

7.3.1. Математичне моделювання системи ГСК морського судна

Проведемо аналіз структури (рис. 7.9) і опис елементів системи ГСК з метою дослідження процесу зміни кроку, оцінки несправностей, що виникають у цьому процесі, уточнення ММ всієї системи ГСК.

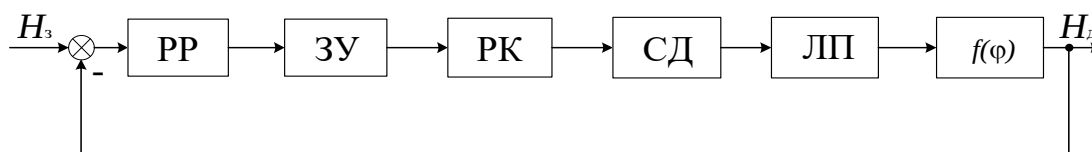


Рис. 7.9. Структура системи ГСК

На структурі системи ГСК (рис. 7.9) представлені: РР - регулятор; ЗУ - гідравлічний клапан золотникового підсилювача; РК - розподільна коробка мастила гідравліки; СД - серводвигун; ЛП - лопаті; $f(\varphi)$ - функція перетворення кута розвороту лопатей у крок гвинта; H_z , H_d - заданий і дійсний крок гвинта, відповідно. Принцип дії ЗУ, представленого на схемі (рис. 7.9), можна описати з використанням схеми, наведеної на рис. 7.10.

На поздовжньому вигляді товщина корпусу підсилювача умовно не відображена. На рисунку позначено: a й b - розміри перетинів каналів для мастила; h - висота паску золотника; $e = (h - a)/2$ - величина перекриття каналу на паску золотника; x - переміщення золотника, м.

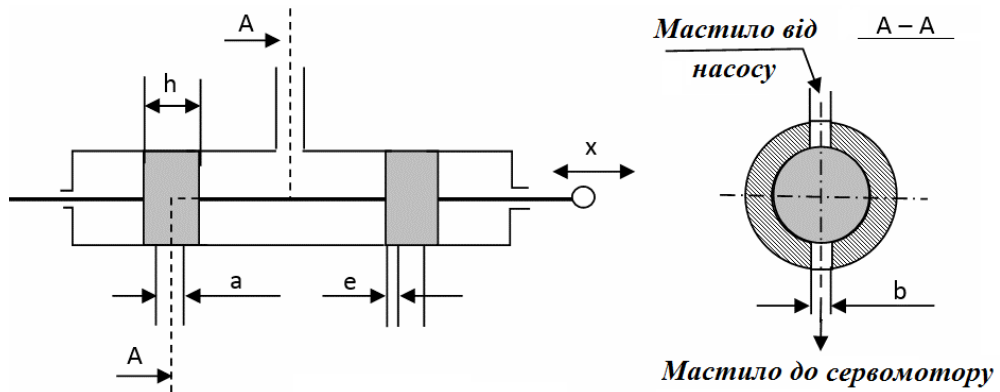


Рис. 7.10. Схема золотникового гідравлічного підсилювача

Витрата масла через підсилювач визначається за [301-305]:

$$Q = xx \cdot b \cdot C_y \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (7.3)$$

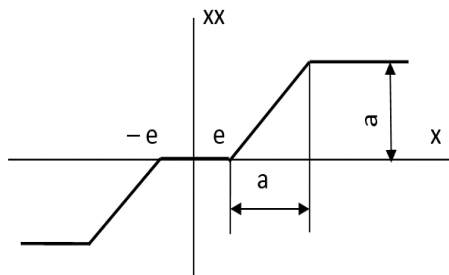


Рис. 7.11. Характеристика відкриття вікна золотника

де, крім відомих величин, $C_y = 0,65-0,75$ - коефіцієнт витрати; Δp - різниця тисків мастила на вході і виході, МПа; $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ - щільність мастила. Приймаємо, що тиск на вході дорівнює тиску після мастильного насоса, а тиск на виході атмосферний; xx - величина відкриття вікна золотника, м. Відкриття вікна

золотника у напрямку висоти паску - нелінійна однозначна симетрична характеристика (див. рис. 7.11). Розподільна коробка гідравлічної системи механізму зміни кроку характеризується елементом з невеликими витоками мастила; серводвигун (СД) і обертові їм лопаті (ЛП) - частини одного механізму. Рівняння руху при розвороті лопатей приймаємо у вигляді:

$$J_{\Sigma} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = M_a - M_r, \quad (7.4)$$

де φ - кут повороту лопаті від положення на вихідному сталому режимі, рад; J_{Σ} - приведений до вісі обертання момент інерції рухомих частин, кінематично пов'язаних з лопатю, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; M_a - механічний момент сервомотору, Нм; M_r - момент сил опору повороту лопаті, Нм.

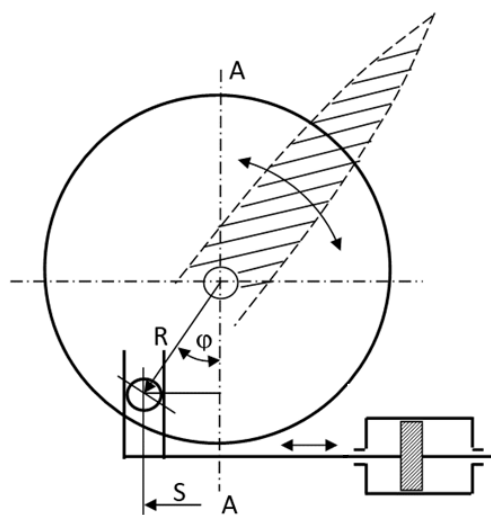


Рис. 7.11. Характеристика відкриття вікна золотника

Момент інерції мас усіх лопатей, наведений до вісей обертання:

$$J_{\Sigma} = iJ_1 + J_{sm}, \quad (7.5)$$

де i - кількість лопатей; J_{sm} - приведений до вісі обертання лопаті момент інерції мас рухомих елементів, динамічно пов'язаних з усіма лопатями (шток і поршень сервомотору, повзун, ланки кінематичної зворотного зв'язку).

Момент інерції маси однієї лопаті, приведений до осі її обертання,

$$J_1 = J_{1e} + M_1 b^2 + J_{1ad} + J_w, \quad (7.6)$$

де J_{1e} - момент інерції лопаті відносно вісі, що проходить через її центр інерції, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; M_1 - маса однієї лопаті, кг ; b - відстоювання центру мас лопаті від вісі обертання, м ; J_{1ad} - приведений до вісі обертання момент інерції мас рухомих елементів, динамічно пов'язаних з однією лопатою (куліса або шатун), $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; J_w - момент інерції мас води, що захоплює лопать при розвороті (так звані “приєднані маси”), $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Розглянемо кулісні-кривошипний механізм зміни кроку гвинта, як найбільш поширену конструкцію (рис. 7.12). З аналізу конструкції видно, що моментами інерції J_{1ad} і J_{sm} можна знехтувати, а J_w можна визначити введенням коефіцієнту добавки (0,2 ... 0,5) до моменту інерції лопаті.

У відповідності зі схемою конструкції механізму зміни кроку (МЗК) (рис. 7.12) момент M_a сервомотору:

$$M_a = F \Delta p R \sin \varphi, \quad (7.7)$$

де F - площа поршня сервомотору, м^2 , Δp - різниця тисків по обидві сторони поршня, Па ; R - радіус кривошипу, м .

Момент сил опору повороту лопаті M_r зі (7.4) дорівнює:

$$M_r = M_g + M_c, \quad (7.8)$$

де M_g - момент гідродинамічних сил опору розвороту, Нм; M_c - момент, що виникає при незмінному положенні лопаті (розраховується за методиками аеродинаміки - аналогічно моменту, який прагне розвернути крило літака щодо осі, паралельної його лонжерону), Нм.

З огляду на те, що судна, які працюють у режимі ДП, мають гранично малі швидкості руху, моментом опору M_c знехтуємо. Момент гідродинамічних сил опору розвороту M_g , визначимо за формулою:

$$M_g = \frac{c\rho hb^4}{64} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2, \quad (7.9)$$

де $c = 1,08$ - коефіцієнт опору; $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3$ - щільність морської води; h - висота лопаті, м; b - найбільша ширина лопаті, м.

Результати моделювання ГСК показані на рис. 7.13.

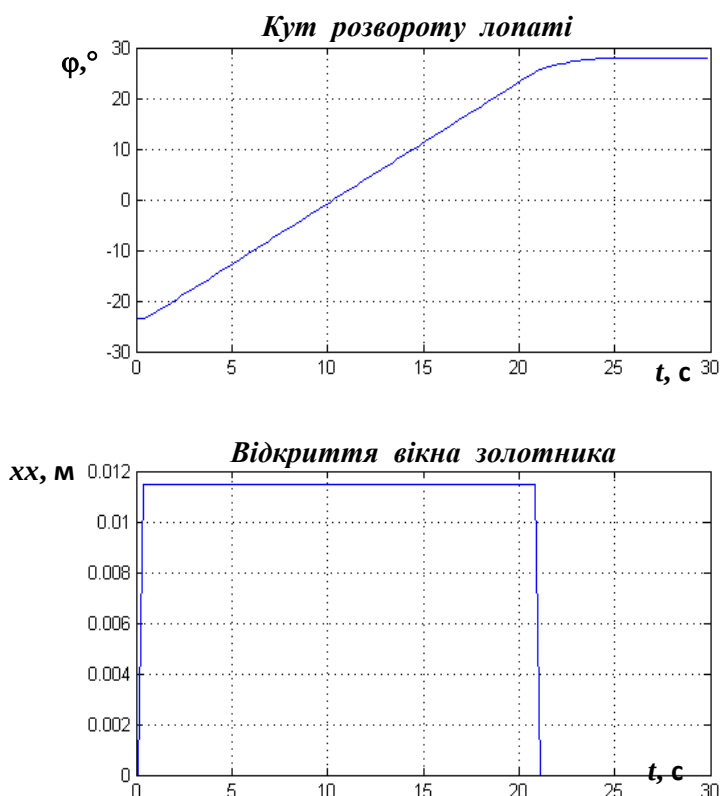


Рис. 7.13. Графіки розвороту лопаті ГСК

Очевидно, що отримані рівняння (7.3)-(7.9) є основою для побудови ММ, що описує функціонування САУК судна з ГСК. Зрозуміло і те, що перехід від алгебраїчних і диференціальних рівнянь, наведених у цьому параграфі, до подання ММ у вигляді ПФ з урахуванням нелінійних елементів, очеви-

дний і не викликає ускладнень. При переході до ММ на основі ПФ з нелінійними елементами синтезовану відомими способами модель можна використовувати при розробці ефективної і стійкої до відмов системи управління ДП. Така САУ дозволить у кінцевому рахунку (при її технічній реалізації), знизити збої у роботі САУК з ГСК і гарантовано забезпечити безпечне функціонування судна у режимі динамічного позиціонування [3, 287, 288].

7.4. Управління судном при стабілізації курсу у різних експлуатаційних умовах

Як встановлено у § 7.1, ключовим елементом сучасних систем управління судна є автостерно. З появою електронних карт і супутникових навігаційних систем, актуальною є проблема не тільки автоматичної стабілізації судна на курсі, але і управління судном вздовж заданій траєкторії, що передбачає виконання курсових маневрів у автоматичному режимі. У зв'язку з цим, виникає потреба у розробці алгоритмів оцінки ефективності роботи та адаптації автостерна у режимі маневрування.

Питання автоматичного регулювання курсу судна розглянуті у багатьох роботах [5, 6, 24, 296-301], з аналізу яких можна виділити два основних напрямки: традиційний, що включає у себе дослідження різних комбінацій П, І, і Д регуляторів, і “інтелектуальний”, який базується на основі теорії штучних нейронних мереж (ШНМ), нечіткої логіки і їх комбінацій [318-323].

Перевагою систем, у основі яких закладені ПІД-закони регулювання, є відносна обчислювальна простота і надійність. Адаптація управління у таких системах досягається шляхом пошуку оптимальних значень коефіцієнтів ПІД-регулятора для еталонної моделі об'єкта управління у певних умовах експлуатації. До недоліків відноситься протиріччя між швидкодією і стійкістю, а також властиве всім замкнутим системам протиріччя між умовами підвищення точності у сталому динамічному режимі і керованість судном.

У роботах [299, 300, 318] розглянуто синтез нейромережі при управлінні курсом судна. Показано, що застосування нейромережного регулятора (НМ-регулятора) дозволяє підвищити якість управління курсом, забезпечує його робастність і здатність обліку нелінійної природи об'єкта управління. Однак, навчання і адаптація НМ-регулятора, верифікація та перевірка САУК судна на стійкість і керованість неочевидні, вимагають значних часових, обчислювальних та інших дослідницьких ресурсів, не кажучи вже про технічну реалізації. Роботи [319, 324] присвячені застосуванню нечіткого регулятора (НЧ-регулятора). Результати моделювання процесу управління судном із застосуванням такого регулятора дозволяють зробити наступні висновки: НЧ-регулятор дає досить високу точність утримання судна на курсі (режим стабілізації) при слабких вітро-хвильових збуреннях. Згідно [319, 324], для різних режимів управління потрібні різні комбінації функцій приналежності НЧ-регулятора, а адаптація регулятора полягає у варіюванні тих самих коефіцієнтів, що і у класичному ПД-регуляторі. Саме це веде до невиправданого, у порівнянні з ПД-регулюванням, ускладнення алгоритмічного апарату і, як наслідок, збільшенню обчислювальних витрат при реальній роботі автостерна. Пропонується розширити можливості вирішення класичної проблеми оптимальної (для заданої ЦФ) стабілізації курсу або ДП судна застосуванням сучасних методів ТАУ.

Розглянемо задачу автоматизованого управління маневруванням судна, яку у загальному вигляді представимо елементами функціональних зв'язків $\langle O, S, \theta, U \rangle$. Рішення пошуку завдання управління має на увазі вибір з області $\mathcal{U}$ закону управління U , який дозволяє досягти мети O при взаємозв'язках C . Функціональні зв'язки системи визначають структуру S і параметри θ системи, а стандартне завдання управління визначається метою управління O з класом законів управління $\mathcal{U} \in U$ і сукупністю взаємозв'язків C , де C - функціональні залежності, що дозволяють описати поведінку динамічної системи. Якість виконання мети O може бути оцінена показником ефективності J , відповідно до якого визначається оптимальне рішення серед безлічі можливих.

У даному випадку показник ефективності J залежить від часу виходу судна на заданий курс, інтенсивності роботи стернового пристрою і точності утримання заданого курсу у режимі стабілізації. Якщо $J \in (0,1)$, а цільова функція $Z \in (0,1)$ характеризує мінімальне відхилення від завдання, тоді $J = 1 - Z$. Для того щоб досягти максимальної ефективності для заданого об'єкта управління необхідно визначити структуру і параметри регулятора $\langle S_c, \theta_c \rangle$ такі, щоб Z була мінімальна. При наявності відомої структури закону управління визначення оптимальних параметрів регулятора може бути вироблено у режимі он-лайн адаптації (підналаштування параметрів - на основі аналізу поведінки об'єкта у реальному часі) і у режимі офлайн адаптації (підналаштування параметрів на основі аналізу поведінки ММ об'єкту - "цифрового двійника" об'єкту управління).

Он-лайн адаптація прийнятна у режимі стабілізації судна на курсі, але не застосовується при виконанні маневру - через швидкі зміни динамічного стану об'єкта управління. Для визначення параметрів і структури регулятора у режимі оф-лайн, у першу чергу, необхідно визначити структуру і параметри ММ об'єкта управління $\langle S_p, \theta_p \rangle$ і ММ впливів, що обурюють $\langle S_w, \theta_w \rangle$. При цьому обмеження і неточності визначення ММ об'єкта і збурювального середовища відображаються на ефективності управління у цілому. Зважаючи на це, рівень ефективності управління курсом, розрахований на основі неповної ММ, не адекватний рівню ефективності, що досягається на реальному об'єкті. Тому важливою характеристикою регулятора є його робастність - стійкість до неточностей у визначених параметрах ММ об'єкта, дій зовнішнього середовища і змін властивостей об'єкту управління.

З огляду на різноманіття станів зовнішніх збурень, стохастичну їх природу, значну зміну характеру їх впливу на судно при маневруванні, зміни властивостей судна (порожній, у баласті, у вантажу) на попередньому етапі розробки регуляторів, зазвичай, збуреннями нехтують. З метою підвищення ефективності процесів управління при обліку збурень (для зменшення витрати палива, підвищення ресурсу експлуатації) при розробці та адаптації ре-

гуляторів вводять у САУК або у систему ДП: а) диференціальну складову; б) низькочастотні смугові фільтри (наприклад, на виході вимірювальних пристроїв - гірокомпас, системи супутникової чи іншої навігації); в) режим (автоматичний/ручний) адаптації параметрів регулятора; г) сигнал оцінки збурення.

7.4.1. Пропорційно-диференціальний алгоритм управління

Один із основних алгоритмів управління, що підвищує ефективність маневрування судна, є ПД-закон. Математична модель системи "судно - стернова машина - ПД-регулятор" може бути представлена інтегро-диференціальними рівняннями:

$$T_1 \cdot T_2 (d^2 r / dt^2) + (T_1 + T_2) (dr / dt) + r = K \cdot \delta + K \cdot T_3 (d\delta / dt) \quad (7.10)$$

$$T_1 \cdot T_2 (d^2 r / dt^2) + (T_1 + T_2) (dr / dt) + r + H(r) = K \cdot \delta + K \cdot T_3 (d\delta / dt) \quad (7.11)$$

$$\psi = \int r dt, \quad (7.12)$$

$$\Delta \psi = \psi_3 - \psi, \quad (7.13)$$

$$\delta_3 = C_p \Delta \psi + C_d r, \quad (7.14)$$

$$\delta = \int \min \left\{ \max \left\{ \frac{\delta_3 - \delta}{T_\delta}, -\dot{\delta}_{\lim} \right\}, \dot{\delta}_{\lim} \right\} dt. \quad (7.15)$$

де T_1, T_2, T_3, K - стали часу і коефіцієнти лінійної (7.10) і нелінійної (7.11) ММ Номото; $H(r) = v_1 |r| + v_2 r^3$ - нелінійна функція кутової частоти r (кутової швидкості) судна з параметрами v_1, v_2 ; δ, δ_3 - поточний і заданий кути перекладки стерна; $\dot{\delta}_{\lim}$ - гранична швидкість перекладки стерна; T_δ - стала часу СМ; ψ, ψ_3 - поточний і заданий курси судна; C_p, C_d - пропорційний і диференціальний коефіцієнти ПД-регулятора курсу.

Щоб знайти оптимальні (відповідно до мінімуму похибки управління) параметри ПД-регулятора, необхідно ідентифікувати параметри ММ судна, наприклад, для (7.10) або (7.11), ММ стернового пристрою, вид цільової функції і функції завдання.

За умови, що контролером можуть задаватися будь-які сформовані впливи управління, максимальна ефективність процесу досягається при міні-

мумі відхилень від курсу і мінімумі перекладань стерна на всьому діапазоні завдань, що може бути відображено цільовою функцією ЦФ виду:

$$Z = \sum_{n=1}^N \left[\sum_{t=1}^T \left(\frac{\Delta \psi_t}{\max(|\Delta \psi_n(1,t)|)} \right)^2 + C_\delta \cdot \sum_{t=1}^T \left(\frac{\delta_t}{\max(|\delta_n(1,t)|)} \right)^2 \right], \quad (7.16)$$

де $\Delta \psi_t$ і δ_t - відхилення від заданого курсу та пера стерна від нульового положення у момент часу t , відповідно; C_δ - ваговий коефіцієнт; T - загальний час виконання маневру і стабілізації на заданому курсі.

Функція завдання представлена виразом:

$$\psi_z(n,t) = \frac{\Delta_\psi \cdot n}{(-1)^{n-1}}, \quad (7.17)$$

де $\Delta_\psi = 1, 5, 10, 20 \dots 90$; $n \in (0, 180/\Delta_\psi)$, а n – змінна (із заданою дискретністю T).

Наведена функція завдання дозволить "програти" за допомогою ММ різні сценарії маневрування з усіма найбільш характерними відхиленнями від заданого курсу. При цьому, мінімізуючи ЦФ (7.16) за результатами "випробувань" на ММ, отримуємо коефіцієнти налаштувань ПД-регулятора. Зрозуміло, що ці коефіцієнти "оптимальні" тільки для маневрів курсом у режимі ходу судна, для якого отримана модель (7.10) або (7.11). На підтвердження сказаного, розглянемо графіки керованості контейнеровозу серії S-175 (див. рис. 7.14), отримані на основі використання фізичної моделі - зменшеної копії судна, створеної співробітниками NTNU (Норвезький інститут науки і техніки) і верифікованої для нелінійної ММ (7.11) експериментами на ротативно-планарному механізмі для різних швидкостей ходу у басейні. З рис. 7.14 видно, що при повороті судна, значення сталої кутової швидкості, визначеної за допомогою ММ, створеної на основі (7.10) і (7.12), має лінійну залежність від куту перекладки стерна.

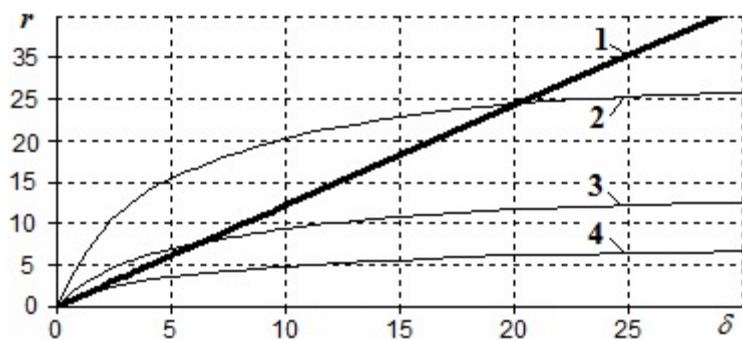


Рис. 7.14. Діаграми керованості контейнеровозу: 1 - ММ (7.10); 2, 3 і 4 - ММ (7.11), де статичні (при $t \rightarrow \infty$) значення швидкості складають 30,0, 15,0 і 7,5 вузлів, відповідно)

У той же час як для верифікованій *NTNU* моделі (7.11) кутова швидкість від куту перекладки нелінійна, що пов'язано з урахуванням коефіцієнту $H(r)$.

Таким чином, відобразити динаміку судна на маневрі із застосуванням лінійної моделі (7.10) з постійними коефіцієн-

тами можливо тільки для малої швидкості ходу при перекладках стерна до 5° . Зрозуміло, що деталізація ММ судна значно ускладнює процес пошуку оптимальних коефіцієнтів закону управління і його подальшої адаптації у експлуатації.

Для пошуку оптимальних коефіцієнтів ПД-регулятора, приймемо модель (7.11), з реперною точкою для кривої зміни кутової швидкості контейнеровозу *S-175* під час перекладання стерна $+20^\circ$ і сталої швидкості ходу 30,0 вузлів, що необхідно для верифікації у процесі ідентифікації параметрів ММ (7.11) за допомогою [5, 9, 21, 24, 36, 325-327]. Налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора для цієї ММ зробимо: а) за методикою Циглера-Ніколса; б) відповідно до алгоритму, наведеному на рис. 7.15.

На рис. 7.16 наведені процеси перекладання стерна і зміни курсу контейнеровозу *S-175*, розраховані на верифікованій моделі *NTNU* (7.11) і лінійній моделі Номото (7.10) з однаковими сталими часу $T_1 = 45$ с, $T_2 = 13$ с, $T_3 = 115,6$ с і коефіцієнтом $K = 0,04$ для налаштованого за методикою Циглера-Ніколса ($C_p = 3,81$, $C_d = 53$) і налаштованого за допомогою запропонованого алгоритму ($C_p = 2$, $C_d = 47$) ПД-регулятора при повороті судна на 90° зі швидкістю 30 вузлів.

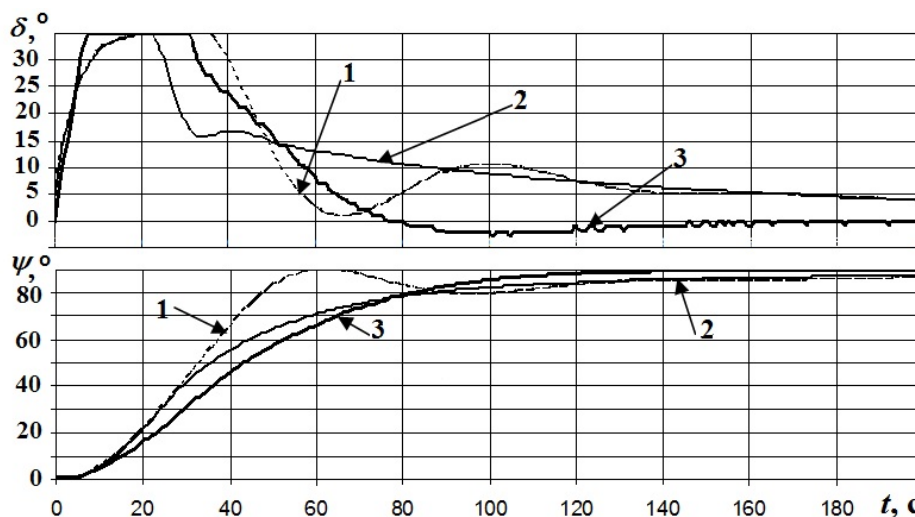


Рис. 7.16. Моделювання процесу перекладки стерна і зміни курсу контейнеровозу S-175 з ПД-регулятором САУК: 1 і 2 – налаштування Циглера-Ніколса для ММ (7.10) і (7.11), відповідно; 3 – налаштування за алгоритмом пошуку ЦФ для ММ (7.11)

Для ММ (7.11) коефіцієнти $v_1 = -3,7 \cdot 10^{-3}$ і $v_2 = 9,4 \cdot 10^{-4}$ ідентифіковані за методикою [9, 21, 24, 36].

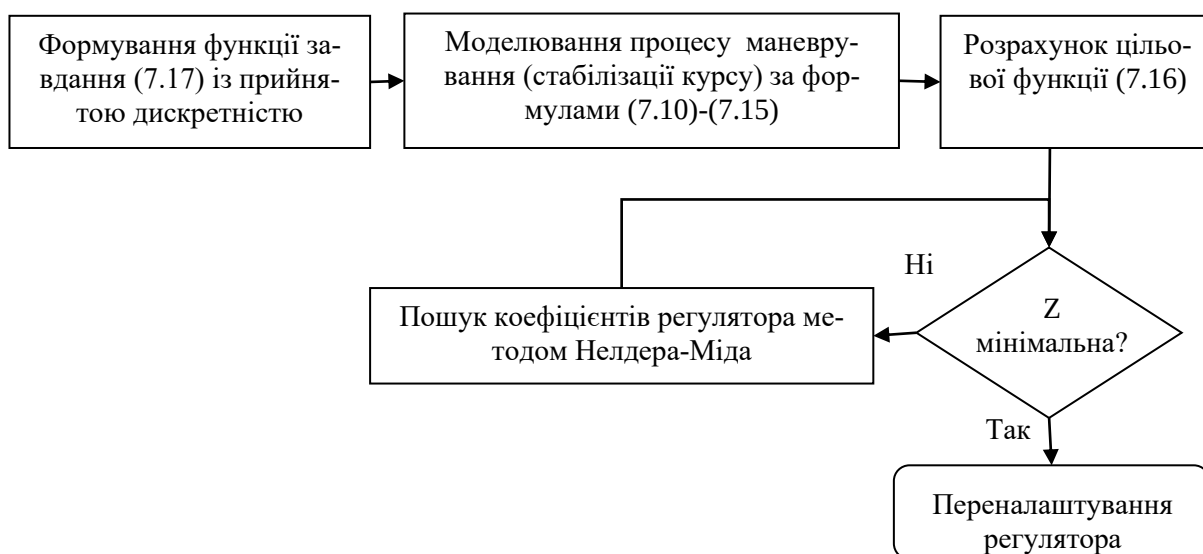


Рис. 7.15. Блок-схема алгоритму налаштування регулятора курсу

Як видно з рис. 7.16, незважаючи на не повну відповідність моделей Номото реальній динаміці судна при маневруванні, налаштування ПД-регулятора у офф-лайн режимі за запропонованим алгоритмом дозволяє отримати досить добрі результати.

Моделювання процесу стабілізації курсу судна проведено без урахування погодних умов і без зміни режимів ходу. Беручи до уваги нелінійну поведінку об'єкта управління (див. рис. 7.14) при змінах режимів ходу і характеру збурюючих впливів, для підвищення якості управління ПД-регулятор необхідно переналаштовувати постійно.

7.4.2. Нейро-мережний алгоритм управління

У роботах [318-324] показано, що застосування нейроних, нечітких (і їх комбінацій) регуляторів у АСУК судна дає високі результати. Але результуюча якість їх роботи суттєво залежить від властивостей і показності навчальних вибірок ММ, що використовуються при навчанні НМ-регуляторів, від застосованих методів фазифікації для НЧ-регуляторів і ряду інших, суб'єктивно представлених, елементів регуляторів [318-324].

Порівняльний аналіз регуляторів (нейромережного, нечіткого і ПД, показав, що для забезпечення умов робастності і стійкості САУК перспективними при вирішенні завдань стабілізації курсу судна, є і нечіткі, і нейроні, і автоматично переналаштовані ПД-регулятори, і однозначного рішення не існує.

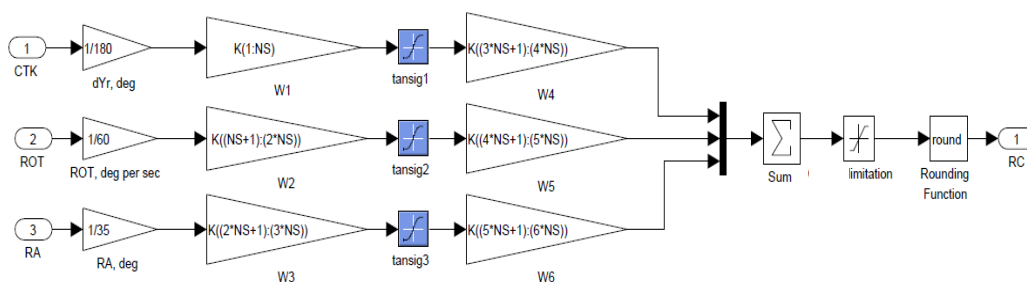


Рис. 7.17. Структура моделі НМ-регулятора АСУК

У процесі розробки і тестування різних конфігурацій НМ-регуляторів на нелінійних ММ динаміки суден різних типів і дедвейту обрана і досліджена проста структура (рис. 7.17): двошарова нейрона мережа прямого поширення, що має три входи - відхилення від курсу, кутова швидкість і положення пера стерна.

Закон управління, використаний при навчанні мережі, прийнятий у вигляді виразу:

$$\delta_3 = \max \left(-35, \min \left(35, \sum_{i=1}^{NS} a_i^{\Delta\psi} \operatorname{th} \left(\frac{\Delta\psi}{180} \cdot b_i^{\Delta\psi} \right) + \sum_{i=1}^{NS} a_i^r \operatorname{th} \left(\frac{r}{60} \cdot b_i^r \right) + \sum_{i=1}^{NS} a_i^{\delta} \operatorname{th} \left(\frac{\delta}{35} \cdot b_i^{\delta} \right) \right) \right) \quad (7.18)$$

де a , b – базові коефіцієнти; NS – розмірність нейромережі.

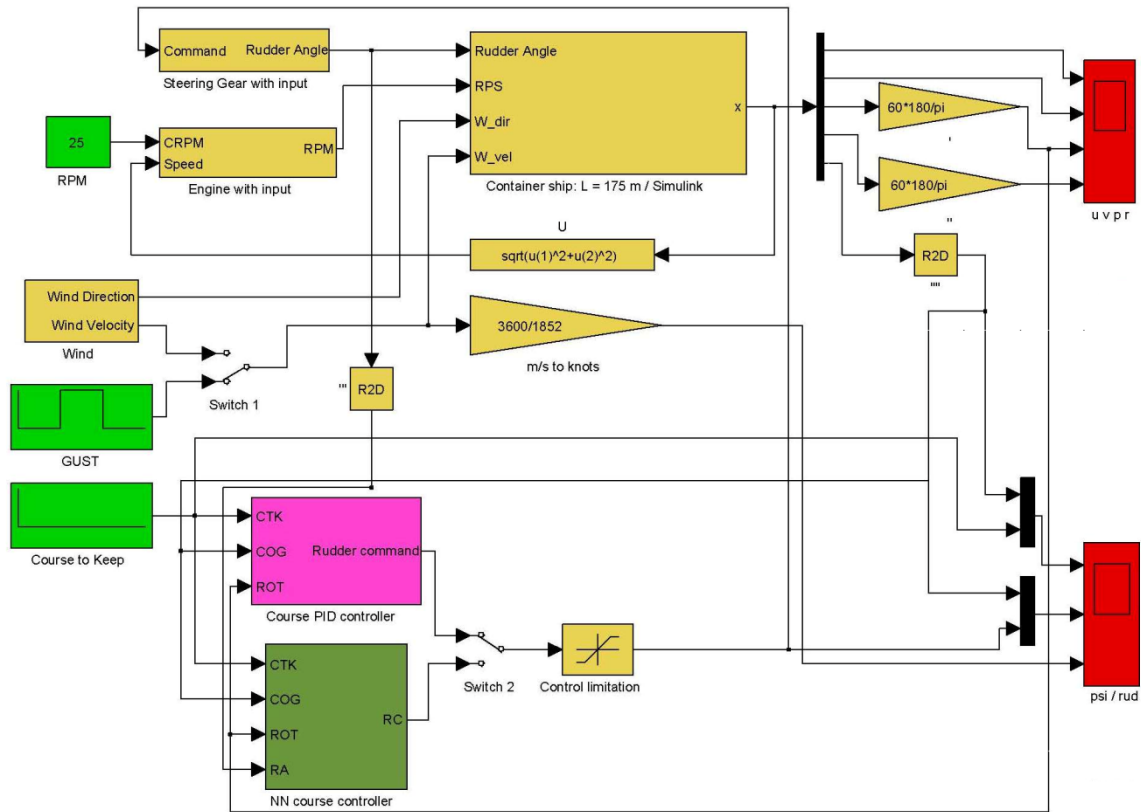


Рис. 7.18. Структура ММ для порівняння ефективності САУК з різними типами регуляторів

Для навчання НМ-регулятора за (7.18) використовується той самий алгоритм, що і для налаштування ПД-регулятора (див. рис. 7.15). При пошуку коефіцієнтів налаштувань застосовується метод генетичних алгоритмів замість методу Нелдера-Міда.

Для порівняння ефективності дії регуляторів проведено математичне моделювання згідно (7.11) динаміки контейнеровоза S-175 зі швидкостями ходу 30,0, 15,0 і 5,0 вузлів, у трьох різних режимах: поворот на 90° при поривчастому вітрі (вітер у борт у момент виходу на курс), стабілізація при пори-

вчастому вітрі (вітер у щелепу), стабілізація при імпульсному вітровому навантаженні (вітер у щелепу).

Таблиця 7.4 - Порівняння ефективності регуляторів у САУК судна

Оцінювані параметри якості	НМ-регулятор	ПД регулятор	Похибка, %
Швидкість судна 30 вузлів, вітер 20/30 вузлів, поворот на 90 град			
СКП кладок стерна, град ²	11.6	13.6	15
Максимальний кут перекладки стерна при одержуванні, град	20	26	
Величина перерегулювання при маневрі, град	<0.5	<0.5	
Час виходу на курс при маневрі, с	60	120	50
Швидкість судна 15 вузлів, вітер 20/30 вузлів, поворот на 90 град			
СКП кладок стерна, град ²	14.64	14.58	-0.4
Максимальний кут перекладки стерна при одержуванні, град	4	0	
Перерегулювання при маневрі, град	<1	-2	
Час виходу на курс при маневрі,с	130	150	13
Швидкість судна 5 вузлів, вітер 20/30 вузлів, поворот на 90 град			
СКП кладок стерна, град ²	7	9	22
Максимальний кут перекладки стерна при одержуванні, град	16	0	
Перерегулювання при маневрі, град	-2	-7	
Час виходу на курс при маневрі, с	250	250	0
Швидкість судна 30 вузлів, вітер 20/30 вузлів, стабілізація			
СКП відхилень від курсу, град ²	0.084	0.167	50
СКП кладок стерна, град ²	0.597	0.526	-13
Швидкість судна 15 вузлів, вітер 20/30 вузлів, стабілізація			
СКП кладок стерна, град ²	2.26	2.34	3
СКП відхилення від курсу, град ²	0.26	1.20	78
Швидкість судна 5 вузлів, вітер 20/30 вузлів, стабілізація			
СКП кладок стерна, град ²	10.41	6.44	-62
СКП відхилення від курсу, град ²	1.51	3.14	52
Швидкість судна 30 вузлів, порив 20 вузлів / 30 секунд			
СКП кладок стерна, град ²	0.851	0.700	-22
СКП відхилення від курсу, град ²	0.099	0.1875	47
Швидкість судна 15 вузлів, порив 20 вузлів / 30 секунд			
СКП кладок стерна, град ²	1.583	1.155	-37
СКП відхилень від курсу, град ²	0.143	0.403	65
Швидкість судна 5 вузлів, порив 20 вузлів / 30 секунд			
СКП кладок стерна (під час стабілізації на курсі), град ²	5.0	3.82	-31
СКП відхилень від курсу (під час стабілізації), град ²	0.530	1.67	68

Фільтрація (осереднення) результатів дозволила отримати наступні усереднені оцінки САУК: а) дисперсія відхилень від курсу у режимі стабілізації з НМ-регулятором майже на 60 % менше, ніж у системі з ПД-регулятором; б) дисперсія кладок стерна у режимі стабілізації з НМ-регулятором на 27 % більше, ніж у системі з ПД-регулятором; в) дисперсія кладок стерна у режимі маневрування у системі з НМ-регулятором на 12 % менше, ніж у системі з ПД регулятором; г) час виходу на курс у режимі маневрування у системі з НМ-регулятором, на 60 % менший, ніж у системі з ПД регулятором. При більш інтенсивній роботі стернового пристрою, НМ-регулятор дозволяє підвищити ефективність маневру і стабілізацію на курсі більш ніж у два рази. При цьому, з падінням швидкості, різниця у ефективності САУК з ПД і НМ регуляторами збільшується у бік останнього.

Математична модель, розроблена у середовищі *MatLab Simulink* приведена на рис. 7.18, а результати зведені у таблицю 7.4.

7.4.3. ПД і релейний алгоритми управління

Вимоги до підвищенню ефективності експлуатації суден вимагають удосконалення існуючих законів управління і реалізації САУК, визначення нових режимів, що забезпечують необхідну швидкодію, керованість, стійкість суден. Зазвичай, ефективність управління у такому випадку досягається налаштуванням коефіцієнтів регулятора САУК. Крім режиму стабілізації судна на курсі на сьогоднішній день виникла необхідність у введенні до існуючої САУК нових режимів, зокрема – режиму переходу на заданий курс за мінімальний час. Можливості ПД-регуляторів практично вичерпані і не завжди задовольняють сучасним вимогам. Зазначимо, що режими переходу на заданий курс при великих курсових поправках у даний час реалізуються вручну. Автоматизація такого режиму вимагає аналізу застосування різних законів управління і вибору з них за критерієм швидкодії. Вирішенню завдання підвищення швидкодії САУК у режимі введення курсових поправок присвя-

чені роботи [4-8, 328-330], де були використані теорема Фельдбаума про n -інтервали і принцип максимуму Понтрягіна.

Оцінимо ефективність застосування альтернативних законів управління моделюванням переходу судна на заданий курс при значних курсових поправках. Критерієм ефективності застосування закону управління вважатимемо швидкодію. Моделювання процесу управління курсом проводимо при відсутності дії на судно зовнішніх впливів. Як об'єкт моделювання використовуємо вантажне судно дедвейтом 16622 тонни з електрогідравлічною стерновою машиною постійної продуктивності (курсова поправка 30°). Для режиму переходу на заданий курс розглянуті ПІД-закон і релейний закони управління. У першому випадку для моделювання процесу переходу судна на заданий курс при значних курсових поправках використовувався налаштований для використовуваного судна ПІД-контролер автостерна (рис. 7.19).

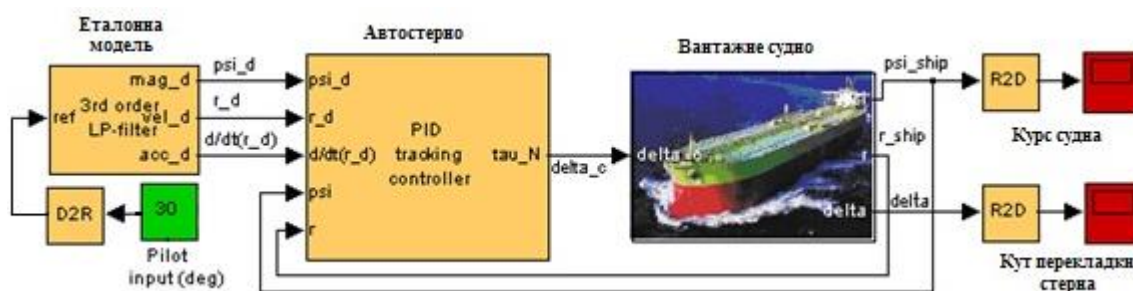


Рис. 7.19. Структурна схема САУК із ПІД-контролером

Моделювання проводилося на платформі *MatLab* з використанням бібліотеки морських суден, установок і засобів управління *GNC* [331]. Результати моделювання процесу управління курсом з використанням ПІД-контролера при введенні курсової поправки зображені на рис. 7.20.

З рис. 7.20 видно, що з використанням ПІД-контролера при курсовій поправці в 30° судно виходить на заданий курс за 95 с. При релейному управлінні величина сигналу відповідає максимально припустимому куту перекладки пера стерна (у даному випадку 35°).

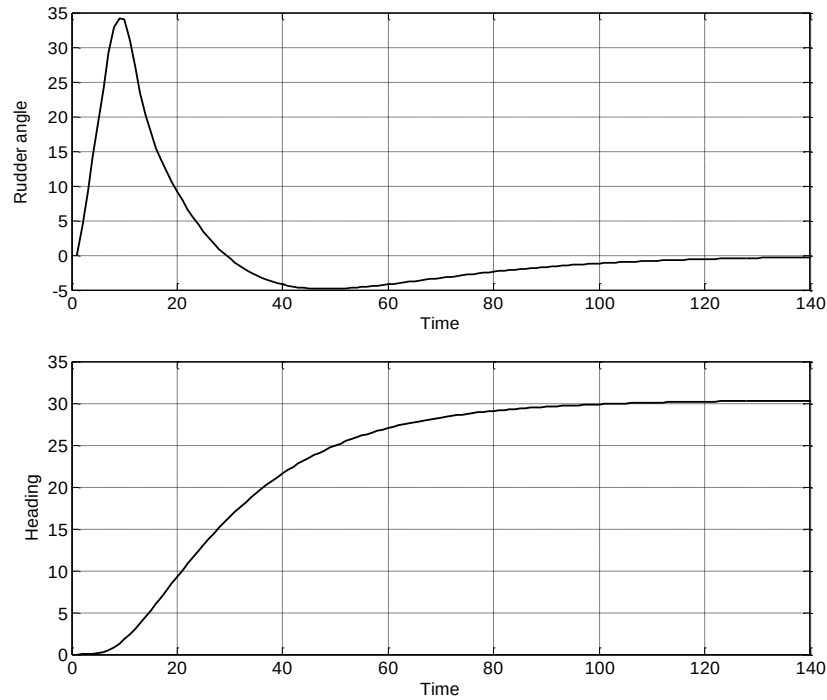


Рис. 7.20. Залежності перекладки стерна і курсу судна від часу при використанні ПД-контролера у автостерні: *Rudder angle* – кут перекладки пера стерна, град; *Time* – час, с; *Heading* – курс судна, град

Моменти перемикання сигналу управління визначалися з системи рівнянь (7.19) [4-8, 20]:

$$\begin{cases} e^{-\lambda t_3} - e^{-\lambda t_2} + e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t''} + e^{-\lambda t'} - 1 = 0, \\ t_3^2 - t_2^2 + t_1^2 - (t'')^2 + (t')^2 + 2 \frac{x_k}{k \dot{\delta}_{\max}} = 0, \\ t_3 - t_2 + t_1 - t'' + t' = 0; \end{cases} \quad (7.19)$$

де t_1 – перший момент перемикання (зміни знака сигналу управління); t_2 – другий момент перемикання, t_3 – момент звернення керуючого сигналу у нуль; $\dot{\delta}_{\max}$ – максимальна швидкість перекладки стерна; λ_1, λ_2 – коріння характеристичного рівняння системи “стернова машина – судно”; $x_k = \alpha_k$ – курсова поправка; $k = k_p k_c$ – коефіцієнт передачі ланки “стернова машина – судно”; t' – час перекладки пера стерна від діаметральної площини до граничного положення, $t'' = t_1 + 2t'$.

Розрахункові параметри системи (7.19) мають значення: $\lambda = 1/T_c = 0,00932 \text{ 1/с}$; $t' = 7 \text{ с}$; $x_k = 30 = 0,523 \text{ рад}$; $\dot{\delta}_{\max} = 5 \text{ °/с} = 0,087 \text{ рад/с}$;

$k = 0,185 \text{ 1/с}$. Система (7.19) вирішена методом сполучених градієнтів за допомогою програми, написаної на мові C+ із застосуванням бібліотеки чисельних методів розв'язання математичних задач *GSL*. У результаті розрахунку для курсової поправки у 30° для обраного судна отримані значення моментів перемикавання: $t_1 = 21,443 \text{ с}$, $t_2 = 45,243 \text{ с}$, $t_3 = 52,243 \text{ с}$. Структурна схема САУК, яка працює за релейним законом, представлена на рис. 7.21.

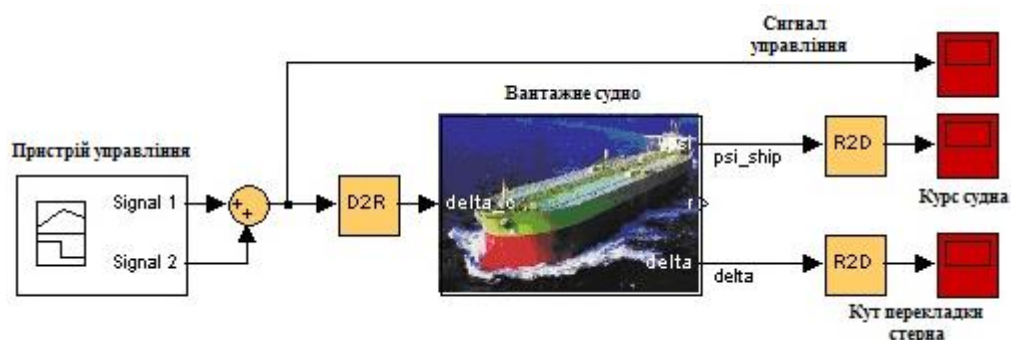


Рис. 7.21. Структурна схема САУК з релейним законом управління

Результати моделювання курсової поправки при релейному законі управління зображені на рис. 7.22. З графіку залежності курсу судна від часу (рис. 7.22) видно, що при курсовій поправці у 30° судно виходить на заданий курс за 65 с, а перерегулювання, обумовлено постійною швидкістю перекладки стерна. Таким чином, моделювання переходу судна на заданий курс при значних курсових поправках із застосуванням ПД і релейного законів управління показує перевагу використання релейного закону управління щодо швидкодії (65 с проти 95 с).

Отримані результати показують ефективність застосування релейного закону управління при автоматизації режиму переходу на заданий курс при великих курсових поправках. Автоматизація такого режиму підвищить безпеку мореплавання і ефективність експлуатації різноманітних морських транспортних засобів., у тому числі - автономних і подвійного призначення.

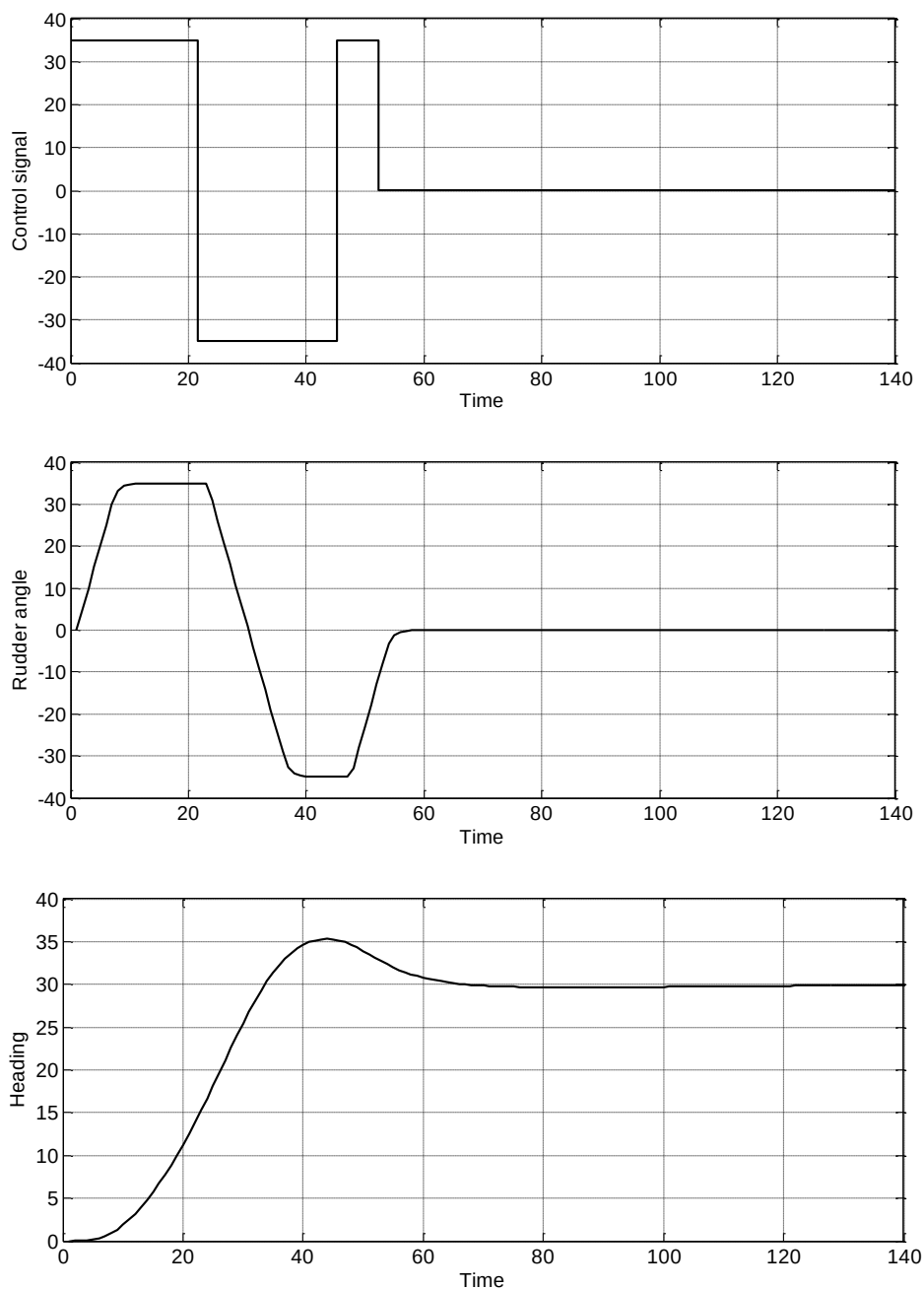


Рис. 7.22. Залежності керуючого сигналу (*Control signal*), перекладки стерна (*Rudder angle*) і курсу (*Heading*) судна від часу при релейному законі управління

7.5. Двоканальна система стабілізації курсу судна

Як наведено у попередніх параграфах цього розділу, теорія управління морськими суднами дозволяє побудувати ММ [298, 306-310], адекватні фізичним процесам руху судна. Зазвичай, ММ динаміки морського судна, ґрунтується на шести ступенях свободи руху твердого тіла у просторі [294-296].

Однак, САУК, що синтезується на основі такої ММ, виходить дуже громіздкою. Компроміс між складністю ММ і адекватністю моделі реальним фізичним процесам, привів до розвитку різних спрощених математичних описів руху судна [325-327]. Міжнародна морська організація (ІМО) розробила і прийняла резолюцію А.751 (18), що регламентує необхідність використання ММ динаміки судна при вирішенні практичних задач, що лежать у області безпеки судноводіння. Морськими класифікаційними органами рекомендовані для практичного використання у автостернових спрощені ММ судна, наприклад, моделі Номото [325-327]. Нелінійна модель Номото (7.11) другого порядку описується диференціальним рівнянням:

$$T_1 \cdot T_2 (d^2 \omega / dt^2) + (T_1 + T_2) (d \omega / dt) + \omega + H(\omega) = K \alpha_r + K T_3 (d \alpha_r / dt), \quad (7.20)$$

де ω – кутова частота (швидкість розвороту) судна; $H(\omega) = v_1 |\omega| \omega + v_2 \omega^3$ – нелінійна функція кутової частоти; $T_1, T_2, T_3, K, v_1, v_2$ – параметри математичної моделі; α_r – кут перекладки стерна.

При оцінюванні параметрів рівнянь (7.11) і (7.20), враховується, що $d\psi(t)/dt = K_1 \cdot \omega(t)$. У цій формулі позначено: $\psi(t)$ – курсової кут; K_1 – конструктивний коефіцієнт судна. Але існує клас систем управління, заснований на принципах двоканального управління. Проте цей принцип майже не застосовується у САУК у зв'язку зі складністю вимірювання зовнішніх збурень, діючих на корпус судна та відхиляючих його від заданого курсу. Таким чином дослідження, з встановлення можливості підвищення точності стабілізації судна на курсі та, відповідно, зниження втрат енергії, що витрачається на “рискання” судном, є новим і актуальним. Мета досягається за рахунок застосування у САУК принципів двоканального (інваріантного) керування, викладених у класичних роботах Г. В. Щипанова, М. М. Лузіна, Б. М. Петрова. Головне зовнішнє навантаження (вітер, хвилі, течія), що діє на судно, має складний характер і робить основний збурюючий вплив на роботу системи стабілізації курсу (ССК). У найбільш загальному вигляді, розглянемо особ-

ливості функціонування ССК, заснованій на застосуванні принципу двоканального управління.

Нехай для будь-якого моменту часу відомо значення основного збурення $I(s)$ та відома точка його прикладання до системи стабілізації вихідної координати $Y(s)$. За допомогою уведення у систему стабілізації властивостей інваріантності до збурень, можна помітно покращити статичні та динамічні властивості всієї системи без втрати її стійкості (Г. В. Щипанов, Б. М. Петров). Одна з вимог теорії інваріантності є наявність двох каналів передачі збурень. Тобто головним завданням є вимірювання збурення, його математична обробка і уведення (другий канал) у систему стабілізації. Але при практичній реалізації систем управління добитися абсолютної інваріантності до збурень неможливо. Відзначимо, що реальні двоканальні системи, зазвичай, забезпечують часткову компенсацію тільки одного, головного, обраного збурення.

Нехай збурення $I(s)$ діє на об'єкт $W_o(s)$ у замкненій системі ($X(s)$ - задавальний сигнал системи, $Y(s)$ - вихідна координата). Система містить елементи, що описані ПФ: $W_p(s)$ - регулятор, $W_o(s)$ - об'єкт керування, $W_{зз}(s)$ - датчик зворотного зв'язку. Якби вдалося створити другий додатковий інформаційний канал, проходячи через який збурення $+I(s)$ перетворювалося у $-I(s)$, то дія цього збурення на об'єкт повністю усунеться. Це витікає з очевидного виразу:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{X(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s) - I(s) \cdot W_o(s) + I(s) \cdot W_k(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{зз}(s)}, \quad (7.21)$$

якщо для (7.21) поставити вимогу $I(s) \cdot W_o(s) = I(s) \cdot W_k(s) \cdot W_p(s) \cdot W_o(s)$, то формальною умовою повної інваріантності до $I(s)$ буде виконання співвідношення $W_k(s) = 1/W_p(s)$.

Для функціонування такого додаткового каналу необхідно мати датчик збурення $I(s)$ і фізично реалізувати передаточну функцію компенсатора $W_k(s)$, яка є зворотною ПФ регулятора $W_k(s) = 1/W_p(s)$. Саме це дозволить одержати значення збурення $I(s)$ зі знаком "мінус". Якщо коефіцієнти передачі вузла

вимірювання $I(s)$ і компенсації $W_k(s)$ залишаться незмінними у широкому діапазоні амплітуд і частот, то властивість інваріантності системи буде існувати практично для всіх амплітуд і частот збурення $I(s)$. Проте, для ССК судна практично реалізувати введення сигналу, що компенсує збурення, яке відхиляє судно від заданого курсу, досить складно. Це пов'язано із тим, що безпосереднє вимірювання вітро-хвильового збурення пов'язано з технічними труднощами, які принципово складно вирішити.

Пропонується [9, 21, 24, 36] простий метод введення у САУК властивостей часткової інваріантності до вітро-хвильового збурення, заснований на непрямому визначенні головного збурення $I_c(s)$, що відхиляє судно від заданого курсу. Непряме вимірювання цього збурення засновано на принципі "диференційної гвиделки" (див. рис. 7.23), тобто шукане збурення $I_c(s)$ визначиться на основі вимірювання сигналів X_1 і Y_1 :

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

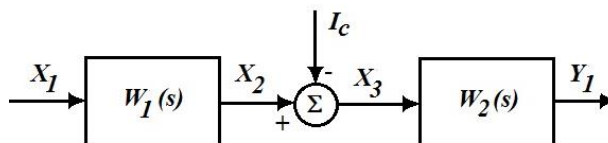


Рис. 7.23. Структурна схема "диференційна гвиделка"

Як зазначено вище, для реалізації двоканальної системи необхідно знати точку прикладання збурення. Вважаємо, що головне збурення $I_c(s)$ приведено до куту повороту стерна, що цілком допустимо з позицій застосування загальної ТАУ у даній постановці задачі. На рис. 7.24 представлена функціональна схема двоканальної ССК, що забезпечує, за рахунок використання додаткового компенсаційного зв'язку, досягнення часткової інваріантності до головного збурення. На рис. 7.24 позначено: РК – регулятор курсового куту ψ судна; КМ – замкнений контур управління стерною машиною судна; МС – ПФ моделі судна, заснована на описі Номото другого порядку; ДЗЗ – датчик зворотного зв'язку (курсного куту); Вим.1, Вим.2, Компенс. – відповідно, пристрої вимірювання та введення позитивного зворотного зв'язку у ССК (компенсації збурення).

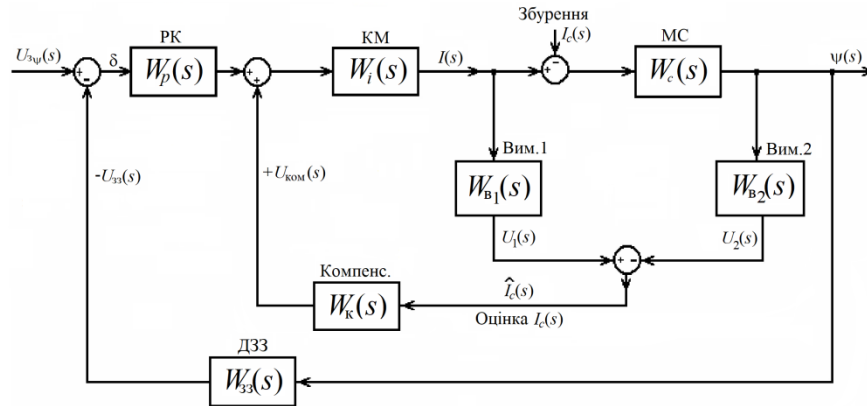


Рис. 7.24. Функціональна схема двоконтурної ССК, що забезпечує часткову інваріантність до $I_c(t)$

Оцінку головного збурення проведемо за виразом, що витікає зі структурної схеми, зображеної на рис. 7.23:

$$I_c(s) = I(s) - \psi(s)/W_c(s) \quad (7.22)$$

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

Очевидно, що цифрова чи аналогова реалізація виразу (7.22) потребує обчислення похідних з усіма відомими, технічними проблемами і обмеженнями. Врахуємо, що реальні пристрої вимірювання куту повороту стерна і курсового куту ψ володіють властивостями фільтрування і часто описуються аперіодичними ланками зі сталими часу T_c і T_t , відповідно. Встановимо на виході датчика куту повороту стерна фільтр з коефіцієнтом передачі та сталою часу, точно такими, як і у датчика курсового куту, а на виході датчика курсового куту – фільтр з коефіцієнтом передачі та сталою часу, такими, як у датчика куту повороту стерна. Це спрощує технічну реалізацію системи за рахунок отримання спільного знаменника у ПФ. З урахуванням викладеного, ділянку структурної схеми, що дозволяє оцінити основне збурення $I_c(s)$, наведено на рис. 7.25.

Оцінене значення основного збурення буде завжди мати динамічну похибку, яка у найкращому випадку, визначається інерційністю аперіодичної

ланки другого порядку $1/((T_c \cdot T_T) \cdot s^2 + (T_c + T_T) \cdot s + 1)$. Збурення, оцінене за допомогою наведеної на рис. 7.25 структурної схеми, визначається як:

$$\hat{I}_c(s) = I_c(s) \cdot \frac{K_T}{(T_T \cdot s + 1)} \cdot \frac{K_c}{(T_c \cdot s + 1)}. \quad (7.23)$$

У вираз (7.23) входить складова $1/W_c(s)$, згідно (7.22).

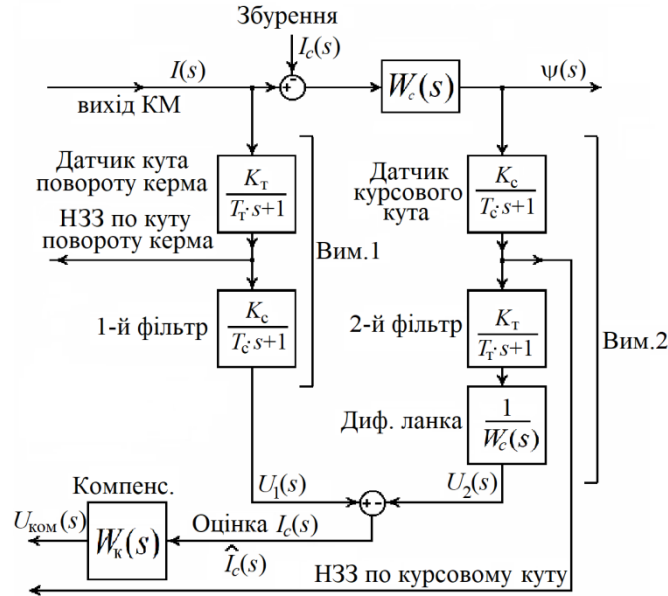


Рис. 7.25. Ділянка структурної схеми (див. рис. 7.24), яка реалізує оцінку гольовного збурення

Очевидно, що: а) результуюча точність оцінки $\hat{I}_c(s)$ залежить від точності технічної реалізації виразу $1/W_c(s)$; б) у системі з датчиком курсового куту і обсервації оцінка буде грубішою, оскільки інерційність такого вимірювального каналу досить висока і порівнянна з інерційністю стернової машини; в) ПФ ланки компенсуючого зв'язку $W_k(s) = W_i^{-1}(s)$ не може бути точно реалізована, оскільки $W_i(s) \approx \frac{1/k_T}{2 \cdot T_{\mu 1}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu 1} \cdot s + 1}$. Тому приймаємо

$$W_k(s) = \frac{2 \cdot T_{\mu 1} \cdot s + 1}{0,05 \cdot T_{\mu 1} \cdot s + 1} \cdot k_T, \quad (7.24)$$

що, у свою чергу, також є помітним спрощенням, заснованим на наближеній математичній моделі стернової машини судна.

Математичну модель судна, засновану на виразі Номото можна представити у середовищі *MatLab* (рис. 7.26). У цій ММ врахована нелінійність

$H(\omega) = v_1 |\omega| \omega + v_2 \omega^3$ у виді блоків Product, Gain 2, Gain 5, Gain 6, Add і Abs.

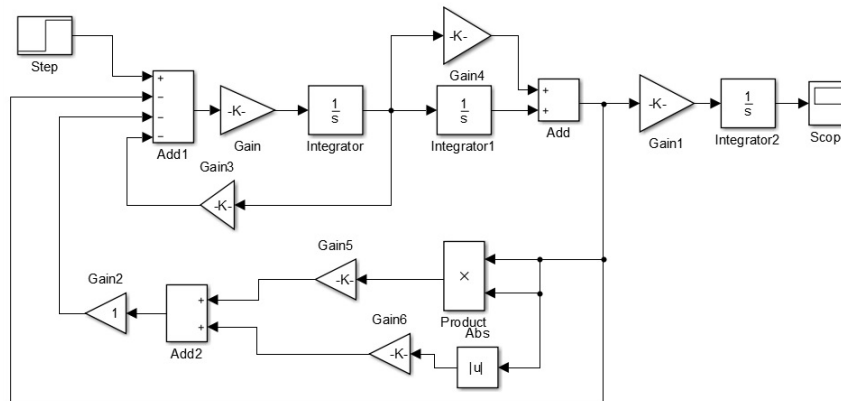


Рис. 7.26. Реалізація виразу (7.20) у MatLab/Simulink (Subsystem і Subsystem 4, що наведені на рис. 7.27)

Моделювання системи (див. рис. 7.24), з урахуванням дії компенсуючого головного збурення, проведено за допомогою схеми, наведеної на рис. 7.27, з використанням методології, викладеної у [9, 21, 24, 36]. Головне збурення моделювалось як періодична сума двох гармонічних впливів (SineWave) різних амплітуд, частоти і фазовим зсувом.

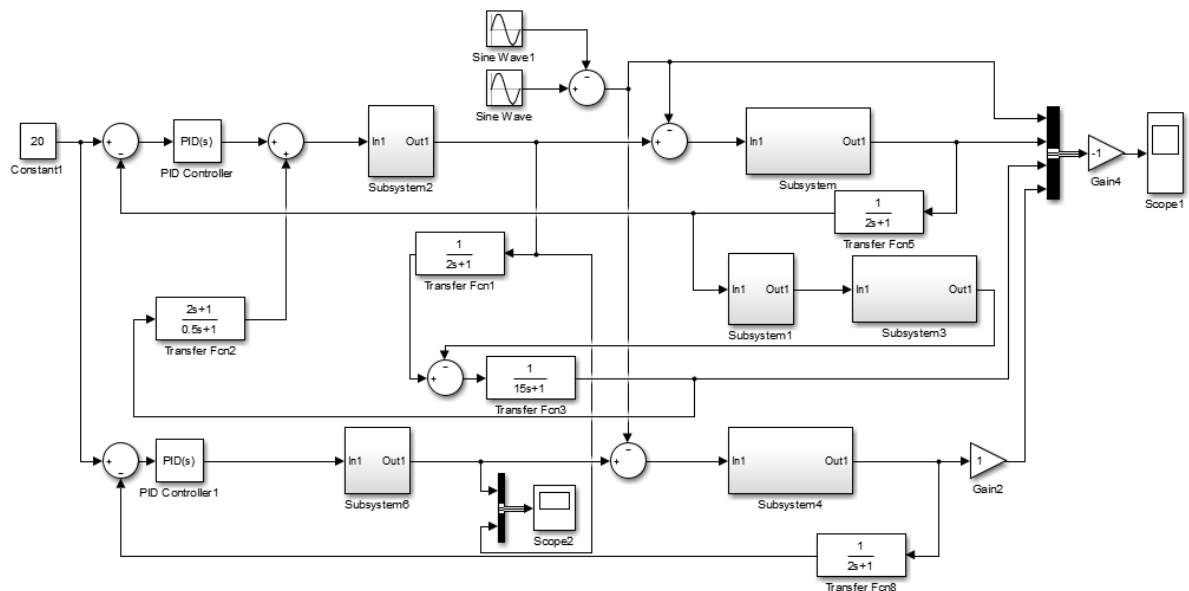


Рис. 7.27. Модель САУК судна на основі реалізації принципу двоканального управління на основі непрямого визначення головного збурення

У якості вихідних даних для моделювання прийнято параметри судна, з довжиною по конструктивній ватерлінії $L_{\text{квл}} = 70,5$ м, об'ємною водотоннаж-

ністю $W = 2864 \text{ м}^3$, сумарною потужністю $N = 4600 \text{ кВт СЕУ}$, при інтервалі швидкостей судна $V = 2...20 \text{ вузл.}$ Параметри моделі (рис.7.26) засновані на результатах ідентифікації (див. табл. 1.)

Таблиця 7.5 - Параметри ММ (7.20) судна

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

Динаміка роботи стернової машини описана ПФ аперіодичної ланки зі сталою часу $T_i = 3,5 \text{ с.}$ На рис. 7.28 показані процеси зміни у часу результуючого збурення (графік 1). Це дуже потужне збурення викликає суттєву зміну курсу судна. Автостерно намагається відпрацювати це збурення за допомогою ПД-регулятора. Параметри ПД-регулятора обрані за допомогою синтезу замкненої системи так, щоб результуючі процеси зміни курсового куту ψ відповідали налаштуванню системи на технічний оптимум (за завданням). Аналізуючи результат моделювання, можна зробити висновок, що стабілізація курсового куту ψ на заданому ССК рівні у -5° з відхиленням у $\pm 2^\circ$ (графік 2) класичною системою з ПД-регулятором майже не здійснюється. Тобто ССК у таких умовах майже не працездатна і потребує переходу на ручний режим стерна або суттєве переналаштування.

При використанні запропонованої оцінці $I_c(t)$ та за допомогою встановлення додаткового каналу компенсації результуючого збурення (див. рис. 3 і рис. 4), динаміка системи, навіть без змінювання налаштування ПД-регулятора автостерна, суттєво покращується. Це ілюструється графіком 3, приведеним на рис. 7, який показує $\hat{I}_c(t)$ - оцінене значення $I_c(t)$ (практично співпадає з графіком 1). Графік 4 - показує змінювання курсового куту у запропонованій частково-інваріантній до збурень системі стабілізації курсу.

З аналізу результатів математичного моделювання запропонованої системи стабілізації курсового куту морського судна можна визначити, що така система є дієвою і ефективно придушує віро-хвильові збурення на корпус судна.

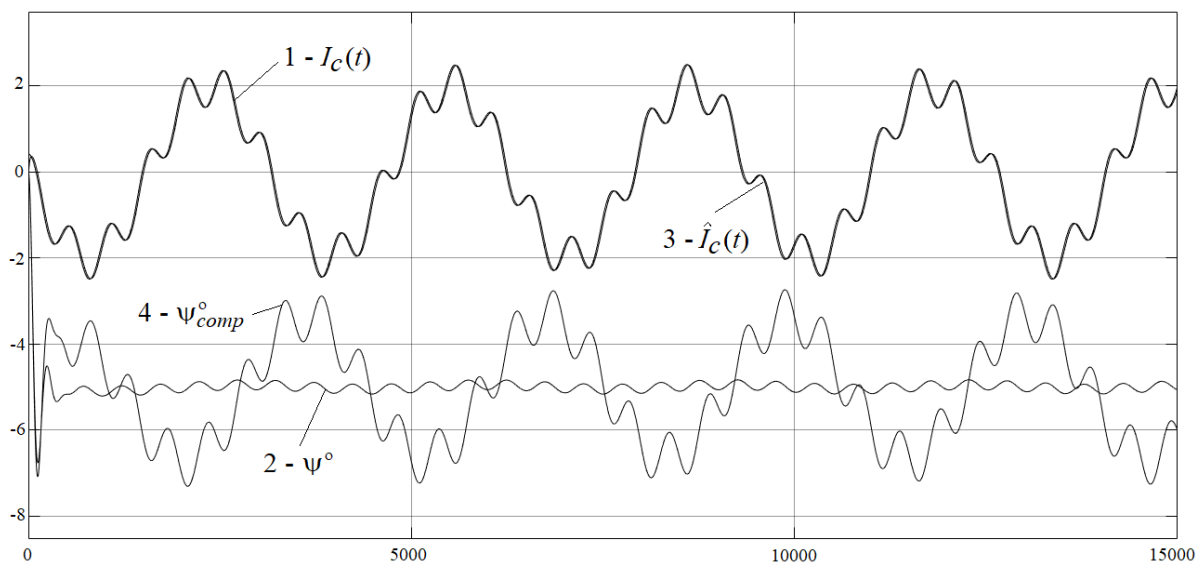


Рис. 7.28. Результати моделювання системи (див. рис. 7.24-7.26) з урахуванням дії компенсуючого головного збурення

Встановлено, що при умові компенсації результуючого збурення на судно, з використанням класичної системи стабілізації "за відхиленням" і ПД "технічно оптимального" регулятора автостерна, максимальне динамічне відхилення становить $\pm 2^\circ$, що неприпустимо. При аналогічних умовах навантажень, але з роботою запропонованої частково-інваріантної до збурень системи стабілізації курсу, отримуємо максимальне динамічне відхилення, близьке до $0,35^\circ$. Додатково можна визначити, що більш ефективна стабілізація курсу судна зумовлена підвищенням швидкодії автостерна за рахунок упередженої дії на стерновий пристрій судна, тобто дії, сформованої каналом позитивного зворотного зв'язку за збуренням. Саме цій ефект визначає зменшення витрат пального і втрати ходового часу.

7.6. Управління маневруванням судна

У теорії і практиці технічної експлуатації флоту є актуальними завдання, не тільки пов'язані з удосконаленням автоматичних пристроїв і систем утримання суден на заданому курсі, але і завдання утримання заданої траєкторії проходження. Особливе це відноситься до спеціалізованих суден (трубо- і кабелеукладальники, днопоглиблювальні і сейсмічні судна, судна спеці-

ального і подвійного призначення, наприклад - безпілотні), де якість роботи САУ оцінюється сукупністю таких показників, як надійність, точність і швидкодія. Досягнення необхідної якості управління курсом і проходженням вздовж траєкторії визначається не тільки принципами і законами, покладеними у основу синтезу ММ і алгоритмів функціонування, але і технічними можливостями, і способами реалізації отриманих алгоритмів. При цьому, ряд способів технічної реалізації алгоритму управління може накладати обмеження, неприйнятні за умовами якості управління, що, у свою чергу, зумовлює необхідність перегляду законів управління, пошуку нових підходів до параметричної і структурної ідентифікації процесу управління [325-327]. Безумовно, рішення (і вдосконалення існуючих) завдань ідентифікації сприяє пошуку раціональної структури САУ судном на траєкторії, однак виходить за рамки дисертації.

Дослідженню системи автоматичного проходження вздовж траєкторії (САПТ) присвячено достатня кількість робіт сучасних авторів, з аналізу яких можна виділити два основних напрямки: традиційне управління, що включає у себе дослідження "класичних" регуляторів], і "інтелектуальне" управління, що базується на основі теорій штучних нейронних мереж (ШНМ), нечіткої логіки і їх комбінацій.

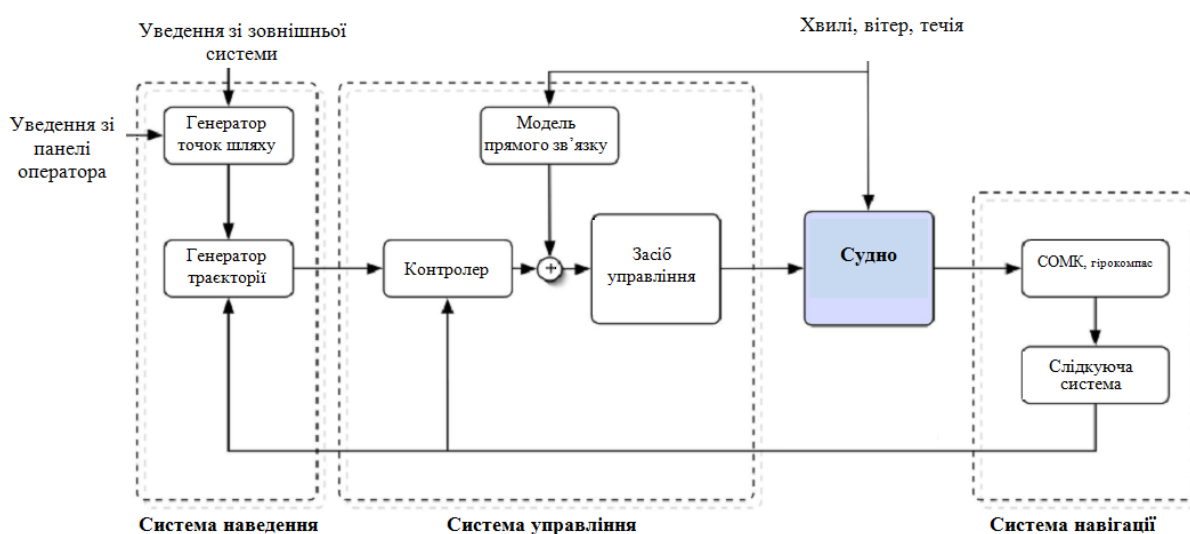


Рис. 7.29. Функціональна схема САПТ

Перевагою САПТ, у основі яких закладено класичні (наприклад ПД) закони регулювання, є обчислювальна простота, надійність і багаторічні апробовані алгоритми. Адаптація до змін експлуатаційних умов у таких системах досягається пошуком оптимальних значень коефіцієнтів регулятора і еталонної моделі (моделі прямого зв'язку), використовуваної при фільтрації у відомих умовах. До недоліків таких САПТ відносяться проблемне протиріччя між швидкістю, стійкістю і підвищенням точності у квазістатичних режимах.

З метою визначення переваг, недоліків, вибору шляху подальших досліджень з цієї проблеми, проведемо аналіз процесу автоматизованого управління судном на заданій траєкторії із застосуванням різних типів регуляторів САПТ. Типова функціональна схема САПТ приведена на рис. 7.29. На цій схемі зображені наступні блоки.

Генератор шляхових точок, відображає точки маршруту, введені у систему з панелі оператора або із зовнішнього джерела. Генератор траєкторії виробляє задану траєкторію проходження судна з урахуванням його динамічних характеристик. Контролер виробляє сигнал, еквівалентний обертальному моменту судна, на підставі відхилення від заданої траєкторії. Модель прямого зв'язку (еталонна модель), використана для випадків, коли доступні сигнали датчиків вимірювання збурювальних впливів, модель використовується для вироблення компенсуючого сигналу, який підсумовується з сигналом виходу контролера і подається на виконавчий механізм засобу управління. Засіб управління, це блок, що описує реакцію стернової машини на сигнал контролера. СОМК, це система визначення місцеположення і курсу судна. Стежна система, це блок прийому, обробки та фільтрації сигналів положення і курсу судна.

Важливо відзначити, що наведений на рис. 7.29 контролер включає у себе два закони управління: за відхиленням від заданого курсу і закон вироблення поправки до заданого курсу у залежності від відхилення від заданої траєкторії. Маневри, здійснювані судном у процесі експлуатації, розділимо

на групи: стабілізація, планові маневри, непланові маневри. Ці поняття можна визначити наступним чином.

Стабілізація - утримання судна на заданому курсі; плановий маневр - виконання маневру з заданими параметрами (швидкістю ходу, граничної кутовий швидкістю, радіусом повороту, граничними перекиданнями стерна); неплановий маневр – значна, і інколи різка, зміна параметрів руху судна, яка виконується вручну, для уникнення небезпеки.

Угруповання маневрів проведено з урахуванням управління тільки стерном, за такими параметрами руху судна: безрозмірна кутова швидкість $\bar{r} = r \cdot L/v$ (L - довжина, v - швидкість судна), відношення сталої швидкості на маневрі до швидкості прямолінійного руху $\bar{v} = v/v_0$, кут перекидки стерна δ .

У таблиці 7.6 наводяться середні значення параметрів руху, отримані за результатами аналізу маневрених характеристик ряду суден [4-8].

Відзначимо, що кладки стерна для забезпечення заданої кутової швидкості (або радіусу повороту) у значній мірі залежать від швидкості ходу судна. Саме тому розподіл перекидань стерна у третьому стовпці таблиці виконаний для наочності та є умовним.

Таблиця 7.6 - Середні значення параметрів суден при маневруванні

Тип маневру	Безрозмірна кутова швидкість, в. о.	Відносна зміна швидкості ходу $\bar{v}$, в. о.	Кут перекидки стерна δ , град
Стабілізація	0,05	1,0	1-5
Планові маневри	0,3	0,83	5-15
Непланові маневри	0,55	0,62	> 15

З метою аналізу роботи САПТ із застосуванням різних типів алгоритмів управління (контролерів) проведено моделювання процесу управління судном при маневруванні. Модель САПТ синтезована відповідно до наведеної на рис. 7.29. Моделювання полягало у виконанні таких маневрів з таблиці 7.6, як “Стабілізація” і “Плановий маневр”. Як об'єкт управління використана модель контейнеровозу S-175 (довжина - 175 м, ширина - 25,4 м, осадка - 8,5 м).

ПІД-регулятор налаштований відповідно до запропонованого алгоритму (див. рис. 7.15), нечіткий контролер і нейромережний [318-324]. Моделювання процесу управління проводилося з урахуванням впливу збурюючих впливів, а саме вітру і течії. Змодельоване збурення має параметри: напрямок вітру $\psi_w = 110^\circ$ з розкидом у 10° , швидкість вітру $v_w = 30$ вузлів з поривами до 10 вузлів; курсовий кут течії $\psi_T = 70^\circ$, швидкість течії $v_T = 2$ вузла. Розрахунок сил від впливу вітру проведено на основі [294-300], облік течії - шляхом рішення векторного трикутника.

Результати моделювання за основними параметрами якості роботи САПТ наведені у таблиці 7.7. З аналізу таблиці можна зробити наступні висновки. У порівнянні із іншими розглянутими типами контролерів у САПТ, нейроконтролер дозволяє виконувати більш точне маневрування на траєкторії, з меншою дисперсією кладок стерна. Суттєвим недоліком нейроконтролера у САПТ є ймовірність неадекватної поведінки у ситуаціях, не передбачених алгоритмом навчання нейромережі.

Таблиця 7.7 - Кількісні показники розглянутих алгоритмів управління

Параметри якості	Нейро-мережне управління	Управління з нечіткою логікою	ПІД управління
Перерегулювання під час маневру на траєкторії, м	19	135	80
Час перерегулювання (під час маневру на траєкторії під дією вітру і течії), с	82	204	197
Дисперсія кладок стерна (під час маневру на траєкторії під дією вітру і течії), град ²	70,8	72,1	141,8
Дисперсія кладок стерна (під час стабілізації на траєкторії під дією вітру і течії), град ²	1,5	58,2	11,0
Максимальний кут перекладки стерна при одержуванні (під час маневру по траєкторії), град	12	15	15
Дисперсія відхилень від траєкторії (під час стабілізації під дією вітру і течії), м	39,8	5,0	48,0

Нечіткий контролер ефективно діє тільки у режимі стабілізації курсу, проте вимагає частих кладок стерна, що у цілому не виправдано з точки зору підвищеної витрати моторесурсу стернової машини і енерговитрат. Для підвищення ефективності роботи нечіткого контролера необхідний дієвий алго-

ритм адаптації, що вимагає додаткових досліджень. ПІД-контролер у САПТ забезпечує надійну роботу всієї системи завдяки своїй простоті. Відображення результатів моделювання із застосуванням нейро-контролера наведено на рис. 7.30.

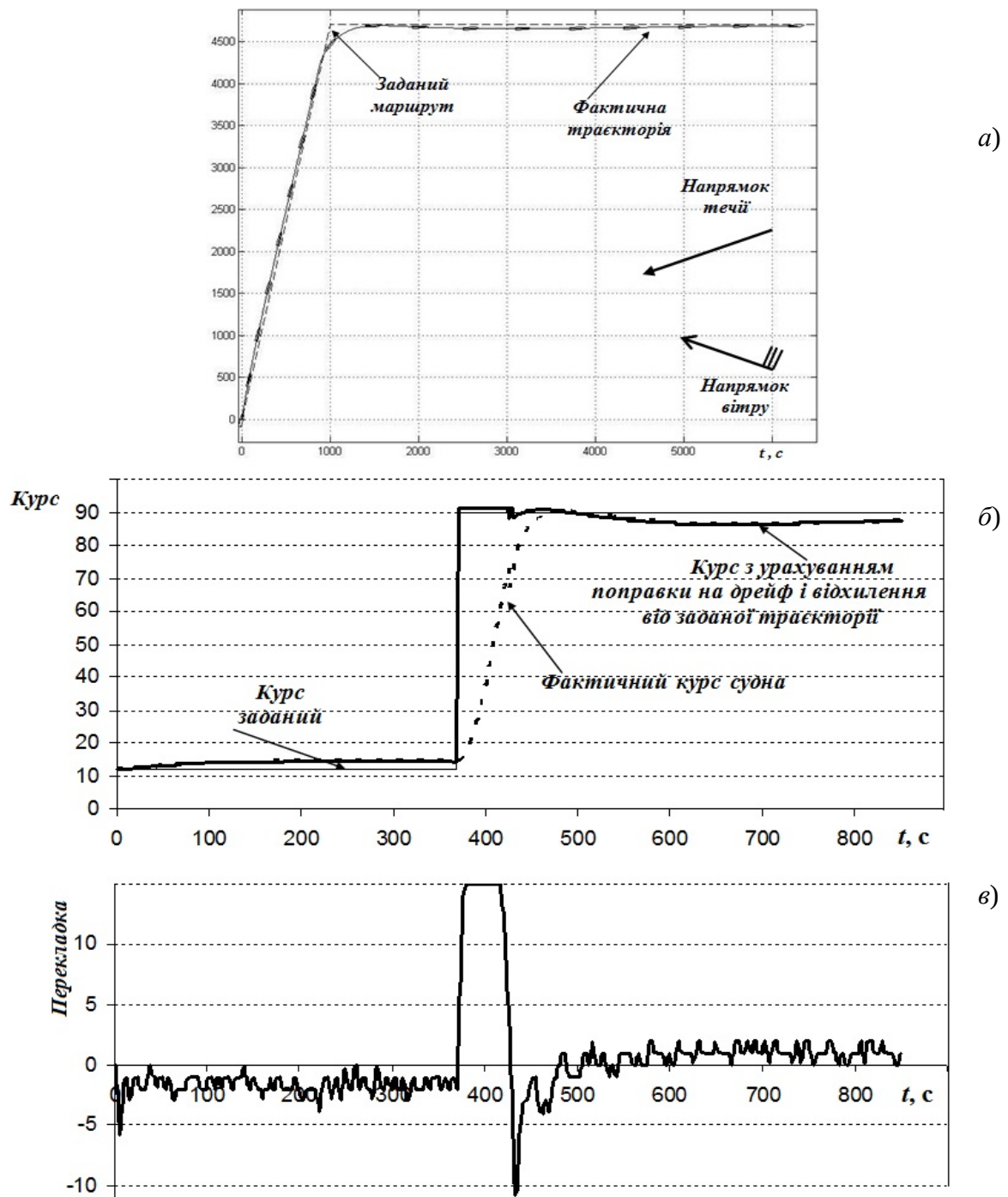


Рис. 7.30. Результати моделювання руху судна із застосуванням нейроконтролера у САПТ: а) траєкторія судна, б) курс судна, в) перекладки стерна

Відносно підвищення експлуатаційних показників судна ПІД-контролер вимагає наявності алгоритму адаптації, а також високочастотного фільтру для невимірюваних збурень (хвилювання).

Для більш точного проходження на траєкторії, задані параметри руху повинні формуватися з урахуванням обмежень, що накладаються змінюваними динамічними характеристиками судна, особливо його інерційності.

Крім того, для більш вірогідного моделювання необхідно урахувати вплив хвилювання на динаміку судна при маневруванні у цілому, а не тільки при накладанні на вимір курсу додаткового випадкового сигналу. Це також потребує подальших досліджень.

При управлінні судном на траєкторії, необхідно оптимізувати два паралельно працюючих закони управління: за відхиленням від заданого курсу і за відхиленням від заданої траєкторії. При цьому необхідна розробка алгоритму переходу від режиму маневрування до режиму стабілізації на курсі при роботі САПТ. Зважаючи на це, відкритою є проблема подальшої розробки САПТ на базі нейроконтролера, із застосуванням ПІД-регулятора у якості додаткового.

Висновки до розділу 7

У розділі наведені результати дослідження у напрямку удосконалення управління технічними системами і комплексами морських суден при їх експлуатації у режимах стабілізації курсу судна, позиціонуванні та режимі стеження на маршруті.

1. На прикладі управління роботою суднового автостерна, наведені можливі варіанти побудови сучасних складних СТС і К, що використовують методи ідентифікації параметрів математичних моделей, класичного (ПД, ПІД), релейного, нейромережного і принципів частково інваріантного до збурень управління. Проведено аналіз структури та принципу дії систем управління курсом судна в умовах періодичних збурень.

2. Дано аналіз особливостей експлуатації систем стабілізації курсу морських суден в умовах збурень та наведена спрощена структурна схема САУК судна. На основі експериментальних діаграм кладок стерна морського судна визначені необхідні для подальшого дослідження типи ММ суден та запропоновані принципи побудови ММ динаміки морських суден. Визначені системи координат для моделювання руху судна та спрощена, на основі процесу маневрування судна, його ММ, яка ураховує гідродинамічні сили і моменти, що діють на його корпус. Як приклад, наведено моделювання процесів маневрування судна "*Maersk Sirac*" із попередньо визначеними значеннями основних коефіцієнтів ММ.

3. Запропоновано цільову функцію Z , що уведена для визначення і верифікації коефіцієнтів ММ судна, яка розбита на динамічну ZD і кінематичну ZK складові та наведена блок-схема запропонованого алгоритму верифікації ММ динаміки судна. Алгоритм заснований на ітераційному пошуку коефіцієнтів, що входять до складу моделі руху судна. Наведені результати моделювання у першому наближенні і після уточнення коефіцієнтів ММ, отримані траєкторії циркуляції і параметри одержування судна, що дозволило провести порівняння результатів коригування коефіцієнтів ММ судна.

4. Проведено математичне моделювання основних елементів систем стабілізації курсу і динамічного позиціонування суден: системи ГСК, золотникового підсилювача тощо. Наведені результати моделювання процесу розвороту лопаті ГСК

5. Досліджені алгоритми управління судном при стабілізації курсу у різних експлуатаційних умовах (на основі діаграми керованості контейнеровозу серії S-175). Досліджено ПД-алгоритм управління і запропоновано алгоритм налаштування регулятора курсу. Проведено моделювання і порівняння процесу перекладки стерна і зміни курсу контейнеровозу S-175 з ПД-регулятором САУК для різних налаштувань ПД-регулятора. Проведено аналіз можливостей і запропонована структура нейро-мережного, ПІД і релейно-

го алгоритмів управління у САУК. Проведено порівняння ефективності САУК з різними типами регуляторів.

6. Запропоновано використання двоканальних систем стабілізації курсу судна на основі "диференційної гвиделки". Наведена ММ САУК судна на основі реалізації принципу двоканального управління із непрямим визначенням головного збурення. З аналізу результатів математичного моделювання запропонованої САУК морського судна встановлено, що двоканальна система є дієвою і ефективно придушує віро-хвильові збурення на корпус судна.

7. Досліджені процеси управління маневруванням судна на основі систем автоматичного проходження вздовж траєкторії (САПТ). Наведено порівняння кількісних показників різних алгоритмів управління (нейро-мережне, з нечіткою логікою і ПД управління). Проведено порівняння ефективності запропонованих алгоритмів для різних експлуатаційних умов плавання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано і доведено нове концептуальне вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності експлуатації морських і річкових суден, яке здійснено за рахунок використання уперше запропонованих і удосконалення існуючих, високоефективних систем управління основними судновими технічними системами і комплексами. Проблема забезпечення високоефективного функціонування суден вирішується за умови гарантування їх безпечної експлуатації і створення відповідних організаційно-конструктивних умов при проектуванні, побудові та технічної експлуатації різноманітних судових технічних систем і комплексів. За результатами дослідження зроблені наступні основні висновки.

1. Проведено загальний аналіз стану і наведені існуючі проблеми розвитку принципів і процесів управління складними СТС і К при їх експлуатації у різних умовах і режимах, визначені основні напрямки дослідження.

2. На прикладі організації управління СЕЕС визначені, засновані із запиту практики, основні проблеми і задачі удосконалення, підвищення енергетичної ефективності і існуючі тенденції розвитку складних СТС і К.

3. Доведено, що проблеми вдосконалення функціонування складних СТС і К ефективно вирішуються визначенням конфігурації та структури їх систем управління.

4. Показано, що існуючі способи комплектації СЕЕС економічно слабо обґрунтовані і неефективні у ряді експлуатаційних режимів. Встановлено, що у найбільш загальному виді побудову сучасних автоматизованих складних СТС і К можна формалізувати апаратом логічних схем алгоритмів.

5. Визначені основні методологічні основи і принципи аналізу та синтезу процедур і процесів управління складними СТС і К (теоретичні засади, головні принципи і методи), визначена "технологія" наукового дослідження.

6. Запропоновано алгоритм синтезу систем управління складними СТС і К, який містить розв'язання завдань, пов'язаних з визначенням архітектури АСУ ТС і К з встановленням основних принципів взаємодії та визначенням особливостей обміну інформацією між частинами системи (підсистемами, апаратурою і т. ін.).

7. На прикладі АСУ СЕЕС доведено, що формування сукупності описів окремих пристроїв СТС і К формальною мовою знакових систем і описів зв'язків між ними, дозволяє визначити загальну алгоритмічну структуру СТС і К, яка є вихідною для подальшої оптимізації. З метою синтезу об'єктно-орієнтованого програмного продукту САУ СТС і К, розглянута інтеграція трьох способів опису: орієнтованих графів, булевих і результатних функцій.

8. На основі розгляду особливостей інформаційно-вимірювальної підтримки при технічній реалізації різноманітних систем управління складними СТС і К запропоновано і обґрунтовано доцільність використання принципу автоматизованого виміру і контролю навантаження у СЕЕС на основі імовірнісного підходу.

9. Запропоновано процедуру вимірювання електроенергетичних параметрів на основі мультипліційної обробки гармонійних величин. Доведено, що така обробка дає можливість за час, що не перевищує один період синусоїдальної напруги, вимірювати із заданою точністю: амплітудні значення струмів навантаження у всіх фазах, лінійну напругу, фазовий кут навантаження, частоту струму і напрямки потужності.

10. Запропоновано семантику і декомпозицію реалізованих завдань управління складними СТС і К. Запропоновано управління складом генераторних агрегатів з урахуванням передаварійних і аварійних станів СЕЕС і керуючих впливів від оператора.

11. Розв'язано завдання координованого управління СЕЕС при динамічних змінах навантаження. Наведені принципи побудови процедур управління складом генераторних агрегатів за принципом "жорстких" і "гнучких" порогів. Доведено, що запропоноване рішення підвищує надійність роботи СА-

ЕЕС, оскільки виключені можливі аварійні режими при завданні помилкових комбінацій управління.

12. Запропоновано САУ СЕЕС за умови мінімуму витрати палива та з урахуванням метеорологічних умов плавання та синтезовані алгоритми оптимізації режимів роботи суднових дизелів.

13. Сформовані бази даних, що визначають необхідну кількість працюючих генераторних агрегатів, їх технічний стан, навантаження, витрату палива й параметри навколишнього середовища. Визначені коефіцієнт перерахування потужності й корегування верхніх порогів завантаження з умов технічного стану й метеорологічних умов плавання.

14. На прикладі САЕЕС синтезовані процеси управління нижнього ієрархічного рівня розподіленої МП-системи. Синтезована структура програмного забезпечення САУ *m*-агрегатною САЕЕС і показані особливості синтезу алгоритмів функціонування супервізора локальних підсистем управління, визначені графи станів дизель-генераторної локальної підсистеми управління і валогенераторної підсистеми.

15. На прикладі роботи суднових дизель-генераторних агрегатів у розподілених МП-системах визначені структури і алгоритми управління, що забезпечують оптимізацію процесів пуску та зупинки окремих агрегатів. Доведено, що запропоновані структури можуть бути ефективно використані при алгоритмізації циклів управління будь-якими іншими технологічними процесами на судні, наприклад, для періодичного виклику програми розподілу активних навантажень між паралельно працюючими генераторними агрегатами.

16. На основі сформованого завдання синхронізації генераторних агрегатів з використанням запропонованих принципів припасування, розв'язано задачу швидкодіючого управління частотою агрегатів, які необхідно синхронізувати. Це дозволило з упередженням часу визначити моменти включення агрегатів при детермінованій і стохастичній постановці завдання синхронізації. Наведені результати експериментальних досліджень процесів синхронізації генераторних агрегатів і доведена ефективність запропонованих рішень.

17. Запропоновано використання стохастичного підходу при вирішенні завдань синхронізації генераторних агрегатів, що дозволило досліджувати процес синхронізації при русі об'єкту синхронізму по заданій траєкторії зі стохастичними флуктуаціями щодо його завдання під впливом зовнішніх факторів. Наведені практичні способи розв'язання завдань управління синхронізацією, показано розв'язання завдання оптимального управління припасуванням частоти синхронізованого об'єкта.

18. Запропонована і створена фізична модель CAEES з використанням SCADA Expert Vijeo Citect V7.40. Наведені результати експериментів зі синхронізації генераторних агрегатів у різних експлуатаційних умовах. Наведені експериментально отримані процеси зміни параметрів генераторного агрегату в умовах збурень під навантаженням, проведено порівняння процесів синхронізації генераторних агрегатів з використанням стандартних алгоритмів управління синхронізатором і з використанням запропонованого дуального управління синхронізатором.

19. На прикладі управління роботою суднового автостерна, наведені варіанти побудови сучасних складних СТС і К, що використовують методи попередньої ідентифікації параметрів математичних моделей окремих елементів, різні алгоритми і системи управління. Дана методика уточнення математичних моделей суден за результатами експериментальних випробувань.

20. Запропоновано використання двоканальних систем стабілізації курсу судна. Встановлено, що запропонована система ефективно придушує вірохвильові збурення та зменшує витрати пального у режимах стабілізації курсу. Досліджені процеси управління маневруванням судна на основі систем автоматичного проходження вздовж траєкторії. Проведено порівняння ефективності запропонованих алгоритмів для різних експлуатаційних умов плавання.

21. Експериментально, та за допомогою методів математичного моделювання, підтверджено, що отримані у дисертації основні наукові результати можуть використатися при визначенні загальної архітектури складних СТС і

К, які гарантують їх високу експлуатаційну ефективність у складних умовах плавання; визначені вимоги до удосконалення тренажерів машинного відділення суден у системі освіти, навчанні, підвищенні кваліфікації і наукових дослідженнях; наведені перспективи розвитку цих тренажерів у частині експлуатації САЕЕС.

22. Основні практичні результати дослідження впроваджені у виробничу діяльність, у навчальний процес ЗВО , а також пройшли апробацію на наукових заходах міжнародного і державного рівня.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шевченко В. А. Верификация функциональных алгоритмов системы управления многоагрегатной судовой электрической станцией / В. А. Шевченко // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2015. – Вип. 21. – С. 70-76.
2. Захарченко В. Н. Решение задач управления судовой электроэнергетической установкой при изменении нагрузки / В. Н. Захарченко, В. А. Шевченко // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – Вип. 36. – С. 74-82.
3. Шевченко В. А. Анализ отказов и математическое моделирование ВРШ судов с системами динамического позиционирования / В. А. Шевченко, А. Д. Пипченко, О. А. Коваленко // Судовождение: сб. научн. трудов. – 2015. – Вип. 25. – С. 162-171.
4. Шевченко В. А. Проблема автоматизации оптимального маневрирования судна и пути ее решения / В. А. Шевченко // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. – 2015. – № 1. – С. 120-127.
5. Шевченко В. А. Исследование процесса перехода судна на заданный курс при различных законах управления / В. А. Шевченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: наук. журнал. – 2015. – Вип. 1(12). – С. 92-97.
6. Шевченко В. А. Анализ работы системы управления курсом судна в условиях периодических возмущений / В. А. Шевченко // Вісник ОНМУ: Збірник наукових праць. – 2015. – Вип. 1(43). – С. 72-76.
7. Пипченко А. Д. Уточнение математической модели ходкости контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний / А. Д. Пипченко, С. В. Копанский, В. А. Шевченко // Судноводіння: Зб. наук. праць. – 2017. – Вип. 27. – С. 169-176.

8. Пипченко А. Д. Математическое моделирование динамики контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний / А. Д. Пипченко, С. В. Копанский, В. А. Шевченко // Судноводіння: Зб. наук. праць. – 2018. – Вип. 28. – С. 141-151.

9. 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 та бізнес-процесів: наук. журн. – 2018. – № 2. – С. 57-63.

10. Шевченко В. А. Алгоритм быстрой оценки параметров судовых электроэнергетических систем / В. А. Шевченко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2018. – № 3(244). – С. 136-141.

11. Шевченко В. А. Синтез алгоритмов управления вало- и дизель-генераторными установками / В. А. Шевченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: наук. журнал. – 2018. – Вип. 2(19). – С. 103-111.

12. Шевченко В. А. Способ решения задач управления процессом пуска и остановки дизель-генератора в системах управления судовыми электростанциями / В. А. Шевченко // Наукові праці: науково-методичний журнал. Серія "Комп'ютерні технології". – 2018. – Вип. 305. – Т. 317. – Видав. ЧДУ ім. П. Могили. – С. 23-29.

13. Шевченко В. А. Оптимизация управления электростанцией из условия минимума расхода топлива и с учетом метеоусловий / В. А. Шевченко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки". – 2018. – № 4. – С. 46-55.

14. Шевченко В. А. Методы измерения и контроля нагрузки электростанции с использованием вероятностных характеристик / В. А. Шевченко // Системные технологии. Регион. сб. науч. тр. – 2018. – Вип. 5(118). – С. 184-195.

15. Шевченко В. А. Метод и особенности синтеза алгоритмов верхнего уровня системы управления судовой электростанцией / В. А. Шевченко // Ві-

сник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2018. – № 6(247). – С. 165-174.

16. Шевченко В. А. Решение задачи оптимального управления подгонкой частоты дизель-генераторов в судовых электроэнергетических установках / В. А. Шевченко // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). – 2018. – № 2(10). – С. 88-92.

17. Шевченко В. А. Оптимизация процесса автоматической синхронизации судовых дизель-генераторов при детерминированной постановке задачи / В. А. Шевченко // Автоматизація технологічних та бізнес-процесів: наук. журн. – 2018. – № 4. – С. 43-52.

18. Budashko V., Shevchenko V. Synthesis of the Management Strategy of the Ship Power Plant for the Combined Propulsion Complex. IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 2018, pp. 106-109.

19. Pipchenko A. D., Shevchenko V. A. Vessel heading robust automatic controller for varying conditions. Marine Intellectual Technologies, 2018, Issue 4(42), V. 4, pp. 208-214.

20. Pipchenko O., Tsymbal M., Shevchenko V. Recommendations for Training of Crews Working on Diesel-Electric Vessels Equipped with Azimuth Thrusters. TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2018, Vol. 12, № 3, pp. 567-571.

21. Volyanskaya Yana, Volyanskiy Serhey, Onishchenko Oleh, Shevchenko Valerii. Ship's course stabilization accuracy improvement by implementing dual-loop control system. Scientific Bulletin of Naval Academy, 2019. Vol. 22, Issue № 2, pp. 94-100. MBNA Publishing House Constanta. DOI: 10.21279/1454-864X-19-I2-011.

22. Пипченко А. Н. Эксплуатация и ремонт одно- и двухтопливных двигателей производства Wartsila в энергетических установках морских транспортных средств: Монография / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко,

В. А. Шевченко, И. Н. Табулинский. – Одесса: ТЭС, 2018. – 361 с. ISBN 978-617-7711-02-4.

23. Шевченко В. А. Эксплуатация судовых технических комплексов с двигателями MAN B&W-ME: Монография / В. А. Шевченко: под ред. проф. О. А. Онищенко. – Одесса: ТЭС, 2019. – 400 с. ISBN 978-617-7711-21-5.

24. Volyanskaya Y. B., Volyanskiy S. M., Onishchenko O. A., Shevchenko V. A., Trudnev S. Yu. Research of possibilities to increase the exactness of ship stabilizing on a course. *Marine Intellectual Technologies*, 2019, Issue 3(45), V. 3, pp. 174-181.

25. Будашко В.В., Шевченко В.А. Вдосконалення стратегії управління багатомасовою електромеханічною системою. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. – 2019. – V. 9 (49), pp. 38-43.

26. Budashko V. Improvement of the operation for electromechanical system under non-permanent loading / V. Budashko, I. Hvozdeva, O. Onishchenko, V. Shevchenko, R. Kudelkin // *15th International Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Slavske, 25-29 Feb. 2020, pp. 35-39, IEEE. <https://easychair.org/cfp/tcset-2020>.

27. Shevchenko V. Requirements for further improvement of engine room simulators in the educational, training and research system. *Proceedings of the 13th International Conference on Engine Room Simulators*, Odessa, NU "OMA", September 20-21, 2017, pp. 102-108.

28. Будашко В. В. Ідентифікаційне маркування деградаційних ефектів на лінії гребних гвинтів / В. В. Будашко, В. А. Шевченко, Д. А. Агапцев // Матер. IX Міжн. наук.-практ. конф. "Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування", 13-14 вересня 2018 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. – С. 112-117.

29. Шевченко В. А. Перспективы развития тренажеров машинного отделения при подготовке судовых инженеров в части эксплуатации судовых электроэнергетических установок // Матер. наук.-метод. конф. "Суднова еле-

ктроінженерія, електроніка і автоматика", 5-6 грудня 2018 р. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 27-32.

30. Пипченко А. Н. Эксплуатация, обслуживание и ремонт двигателей MAN B&W-ME / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко. – Одесса: ТЭС, 2014. – 325 с. ISBN 978-617-7054-76-3.

31. Пономаренко В. В. Эксплуатация судового высоковольтного электрооборудования / В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко: под ред. А. Н. Пипченко. – Одесса: ТЭС, 2014. – 283 с. ISBN 978-617-7054-31-2.

32. Пипченко А. Н. Судовые автоматизированные механические установки / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко. – Одесса: ТЭС, 2015. – 366 с. ISBN 978-617-7337-10-1.

33. Пипченко А. Н. Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, Ю. И. Теплов, В. А. Шевченко. – Одесса: ТЭС, 2019. – 567 с. ISBN 978-617-7337-13-2.

34. Пипченко А. Н. Техническая эксплуатация одно- и двухтопливных двигателей Wartsila-Sulzer / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко, И. Н. Табулинский. – Одесса: ТЭС, 2017. – 338 с. ISBN 978-617-7337-52-1.

35. Пономаренко В. В. Судовое высоковольтное оборудование / В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко: под ред. А. Н. Пипченко. – Одесса: ТЭС, 2017. – 300 с. ISBN 978-617-7337-55-2.

36. Ya. Volyanskaya, S. Volyanskiy, O. Onishchenko, V. Shevchenko. Reserch of possibilities of increase of exactness of stabilizing of ship on a course / SEA-CONF 2019, 5th International Conference. May 17-18, 2019, Constanta. "Mircea cel batran" Naval Academy. <https://www.anmb.ro/ro/conferinte/sea-conf/arhiva/program%20sea-conf%202019.pdf>.

37. Шевченко В. А. Підготовка фахівців з експлуатації високовольтного обладнання з використанням розподільчого пристрою NXAIR фірми Siemens / В. А. Шевченко, С. Ф. Самонов, В. О. Дубовик // IX Міжн. наук.-техн. конф. "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика" (SEEEA-2019). 5-6 грудня 2019 р. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 22-24.

38. Шевченко В. А. Проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективності і тенденції розвитку складних суднових технічних систем і комплексів / В. А. Шевченко, О. А. Онищенко // IV Міжн. наук.-практ. конф. "Perspectives of world science and education", 25-27 грудня 2019 року, Осака, Японія, CPN Publishing Group. – С. 86-96.

39. Hvozdeva I. Problems of improving the diagnostic systems of marine diesel generator sets / I. Hvozdeva, V. Budashko, V. Myrhorod, V. Shevchenko // *15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Slavske, 25-29 Feb., 2020, pp. 350-354, IEEE. <https://easychair.org/cfp/tcset-2020>.

40. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#n13>

41. Морська доктрина України на період до 2035 року. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1307-2009-%D0%BF#n12>

42. Тематика наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок МОН України.

<https://mon.gov.ua/ua/nauka/nauka/tematika-naukovih-doslidzhen-i-naukovo-tehnichnih-eksperimentalnih-rozrobok-mon>

43. Конкс Г.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта / Г.А. Конкс, В.А. Лашко. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.

44. Андрианов И.В. Асимптотическая математика и синергетика: путь к целостной простоте / И.В. Андрианов, Р.Г. Баранцев, Л.И. Маневич. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 304 с.

45. Проектування пропульсивної установки суден з прямою передачею потужності на гвинт: навчальний посібник / В.П. Шостак, В.І. Гершанік, В.П. Кот, М.С. Бондаренко; за ред. В.П. Шостака. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 500 с.

46. Дорогань О.И. Проектирование специализированной SCADA-системы для автономных электроэнергетических установок / О.И. Дорогань,

А.О. Ушкаренко // Матер. III Міжн. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» – Миколаїв, 2012. – С. 510-512.

47. Павлова С.В. Аналіз людського фактору під час керування сучасним повітряним кораблем / С.В. Павлова, Л.В. Благая // Вісник НАУ. – 2012 – № 4 – С. 20-25.

48. Гончаренко А.В. Моделирование влияния энтропии субъективных переваг на принятия решений относительно ремонта судовой энергетической установки. Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 2009. – № 1 (23). – С. 123-131.

49. Голиков В.А. Человеческий фактор в условиях эксплуатации судна / В.А. Голиков, В.В. Голиков // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник / ОНМА. – Одесса, 2008. – Вып. 21. – С. 78-86.

50. Гончаренко А.В. Влияние субъективных переваг на показатели работы судовой энергетической установки. Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 2008. – № 2 (22). – С. 105-111.

51. Тихонов І.В. Ефективність інтелектуалізації інтегрованих систем навігації і управління рухомими транспортними засобами / Г.Л. Баранов, І.В. Тихонов // Наукове періодичне видання Центрального науково-дослідного інституту навігації і управління. – К : ЦНДІНіУ, 2010. – Вип. 1. – С.13-20.

52. Будашко В. В. Оценка эффективности компенсации деградационных эффектов в комбинированном пропульсивном комплексе / В. В. Будашко // Судовые энергетические установки. - 2015. - Вып. 36. - С. 50-56.

53. Analysis of Station Keeping Incident Data 1994-2003. IMCA M 181. – IMCA, 2006. – 53 p.

54. Гончаренко А.В. Варіанти вибору стратегії підтримання безпеки функціонування транспортної системи. Вісник НАУ. – 2009. – № 2 (39). – С. 30-35.

55. Гончаренко А.В. Показники безпеки функціонування транспортної системи в умовах зростання цін на паливе. Вісник НАУ. – 2009. – № 1 (38). – С. 35-39.

56. Миусов М.В., Торский В.Г. Проблемы обеспечения безопасности судоходства Черного и Азовского морей. Современные проблемы повышения безопасности судоходства: мат. науч.-метод. конф. – Одесса: Издательство ОНМА, 2009. – С. 76-80.

57. Логишев И.В., Онищенко О.А. Управление технической эксплуатацией флота. - 2016. - 232 с. - Одесса: "Феникс", 2016. ISBN 978-966-928-088-6.

58. Голиков В.А., Онищенко О.А.. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології. Суднові енергетичні установки. – 2017. № 37. – С. 13-27.
<http://old.onma.edu.ua/content/nauka/seu/37.pdf>; <https://clck.ru/DCFp3>.

59. Лепский А.Г., Цветков В.В. Щеглов А.А. Основные направления развития систем комплексной автоматизации на флоте. Вестник МГТУ (Т.7). – М.: МГТУ, 2004. – №3. – С. 409-418.

60. Дорогань О.И. Проблемы автоматизации судовых электроэнергетических установок.. Матеріали ІАЕ НУК. – Миколаїв, 2012. – С. 136-139.

61. Корнилов Э.В., Бойко П.В., Голофастов Э.И. Технические характеристики современных дизелей. Справочник. – Одесса: ОНМА, 2008. – 272 с.

62. Mukund R. Patel. Shipboard electrical power systems. CRC Press, 2012. 370 p.

63. Clarke, N.J. (2004), Marine electrical power systems, 2nd Intern. Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2004 (PEMD 2004)

64. МАРПОЛ 73/78. <http://docs.cntd.ru/document/499014541>.

65. Суворов П.С. Управление режимами работы главных судовых дизелей. – Одесса: ЛАТСТАР, 2000. – 238 с.

66. Rai G.D. An Introduction to power plant Technology. 3rd edition, Delhi Khanna publishers, 1997, 210 p.

67. Дорогань О.И. Микропроцессорные средства управления параллельной работой дизель-генераторных агрегатов. Матер. Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнародною участю. – Миколаїв, 2013. – С. 3-7.

68. McCrone A. K. L., Diesel Plant Operator's Hand Book, Pitman, ISBN-10: 0273409603.

69. Klaus Mollenhauer (Ed.), Helmut Tschoeke (Ed.) (2010). Diesel engine engineering hand book, Springer, ISBN-10: 3540890823.

70. M. Morsy El-Gohary. Overview of past, present and future marine power plants, Journal of Marine Science and Application, 2013, 12 (2), pp. 219-227.

71. Гельфанд А.М. Создание автоматизированной системы технологического управления процессами функционирования и эксплуатации электрических сетей ЕНЭС / А.М. Гельфанд, В.Г. Наровлянский, Л.И. Фридман, А.С. Березин и др. // Электрические станции. – М.: Научно-техническая фирма «Энергопрогресс», 2007. – С. 13-23.

72. Дорогань О.І. Дослідження впливу структури електроенергетичної установки на характеристики інформаційних потоків в мережі керування. Вестник ХНТУ. – Херсон, 2013. – №1(46). – С. 366-371.

73. Прангишвили И.В. Состояние уровня автоматизации энергетических объектов и системотехнические решения, направленные на его повышение / И.В. Прангишвили, А.А. Амбарцумян, А.Г. Полеткин, Г.Г. Гребенюк, И.Б. Ядыкин // Проблемы управления. – М.: ООО «СенСиДат-Контрол», 2003. – №2. – С. 11-26.

74. Тихонов І.В., Баранов Г.Л. Ергатичні інноваційні технології управління рухом суден. Судноводіння. Збірн. наук. праць. – Вип. 26. – Одеса: ВидавІнформ, 2016. – С. 10-19.

75. Павлов В.В., Скрипец А.В. Эргономические вопросы создания и эксплуатации авиационных электрифицированных и пилотажно-навигационных комплексов воздушных судов. – К.: КМУГА, 2000. – 460 с.

76. Зараковский Г.М. Закономерности функционирования эргатических систем / Г.М. Зараковский, В.В. Павлов. – М.: Радио и связь, 1987. – 232 с.

77. Головань В.Г., Кравчук О.І., Маслій О.М., Онищенко О.А. Методологія та організація наукових досліджень – Одеса: Військова академія (м. Одеса), 2015. – 389 с.

78. Голяков В.А., Козьмініх М.А., Онищенко О.А. Методологія наукових досліджень. – Одеса: ОНМА, 2014. – 163 с.

79. Машков О.А., Усаченко Л.М. Направления развития теории функционально-устойчивых сложных систем управления. Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матер. міжн. наук. конф. ISDMCI`2009. – Херсон: ХНТУ, 2009, том 1. – С. 79-86.

80. Дмитриев А.К., Малинцев П.А. Основы теории построения и контроля сложных систем. – Л.: Энергоатом издат., 1998. – 192с.

81. Берталанфи Л. Фон. Общая теория систем: критический обзор: монография. – Изд. «Прогресс», 2012. – С. 82.

82. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

83. Гермейер Ю.Б., Моисеев Н.Н. О некоторых задачах теории иерархических систем управления. Проблемы прикладной математики и механики. – М.: Наука, 1971. – С. 30-43.

84. Системный подход в современной науке: к 100-летию Л. фон Берталанфи / отв. ред. И.К. Лисеев, В.Н. Садовский. – М.: Прогресс-Традиция, 2004. – 563 с. – ISBN 5-89826-146-X.

Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=444466>.

85. Грановский В.А., Синая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

86. Кутяшова А.Ю. Усовершенствование систем сбора и отображения информации на энергообъектах. Сборник докл. 3-й всеросс. конф. «Реконструкция энергетики – 2011». – М.: ООО «Интехэко», 2011. – С. 81-85.

87. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

88. Тихонов І.В. Основи теорії похибок вимірювань. 1-е вид. / І.В. Тихонов, В.С. Давидов, С.М. Кучерук, В.І. Богом'я. Методичний посібник КДАВТ. – Київ, 2013. – 66 с.

89. Волянський С.М., Волянська Я.Б. Моделювання електромеханічних систем. Навчальний посібник. За ред. проф. О.А. Онищенко. - 2018. - 236 с. - Миколаїв: Іліон. - ISBN 978-617-534-483-5.

90. Карандашов Ю. С. Математическое моделирование электрических нагрузок судовых электростанций. Судостроение. – М.: Судостроение, 2004. – №2. – С. 31–34.

91. Хоанг Дык Туан Повышение эффективности имитационного моделирования нагрузок судовых электростанций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. С.-Петербург. гос. мор. техн. ун-т. – СПб, 2010. – 23 с.

92. Рябенкий В.М. Моделирование режимов работы судовых потребителей электроэнергии с использованием диаграмм состояний / В.М. Рябенкий, А.О. Ушкаренко, О.И. Дорогань // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. Специальный выпуск Т.2. – Харьков, 2013. – №8(114). – С. 84-89.

93. Головки С.В. Моделирование автоматической системы управления судовой электростанции с учетом состояния оборудования. Вестник Астраханского государственного технического университета: научн. журнал. – Вып. 3 – Астрахань, 2014. – С. 58-63.

94. Тихонов І.В. Процесні перетворення моделей для діагностики й контролю функціонування об'єктів інтелектуальних транспортних систем / Г.Л. Баранов, І.В. Тихонов, Г.Г. Соболевський, О.М. Прохоренко // Стандартизація, сертифікація, якість. – К.: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2016. – № 6 (103). – 100 с.

95. Kithsiri U.G., Senanayake N.S., Abeyweera R., Jayasuriya J. A Model for Estimation of De-rating in Diesel Engines used for Power Generation. Interna-

tional Journal of Energy Engineering, 2016, 6(2): 36-42. DOI: 10.5923/j.ijee.20160602.03.

96. Рябенський В.М. Імітаційне моделювання процесів комутації споживачів в автономних електроенергетичних установках / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко, Аль-Суод Махмуд Мохаммад, Халед Омар Ганнам // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2011. – №4. – С. 123-129.

97. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д.П. Ким. – М.: Физматлит, 2004. – 464

98. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.

99. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации: монография / В.М. Кунцевич. – К.: Наукова думка, 2006. – 264 с.

100. Fossen T.I.. Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles, Marine Cybernetics AS, Trondheim, Norway, 2002.

101. Меньков А.В., Острейковский В.А. Теоретические основы автоматизированного управления. - М.: Оникс, 2005. – 640 с.

102. Небылов А.В. Гарантирование точности управления. – М.: Наука. Физматлит, 1998. – 304 с.

103. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5 томах.; 2-е изд., перераб. и доп. Т4. Теория оптимизации систем автоматического управления. Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: МГУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 744 с.

104. Стадник А.И. Выбор метода многокритериальной оптимизации для управления водным транспортным средством / В.Ф. Лавриненко, А.И. Стадник, В.П. Тарохтей. Водний транспорт, 2014. – Вип.3 (21). – С.11–14.

105. Пат. 94181 Україна, МПК В63Н 25/00. Спосіб вибору оптимальної комбінації режимів експлуатації суднової рульової машини / А.В. Гончаренко; заявник та власник патенту Національний авіаційний університет. – № u 2013 09054; заявл. 19.07.2013; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 21.

106. Интрилигатор М. Математические методы оптимизации и экономическая теория / М. Интрилигатор. – М.: Айрис-пресс, 2002. – 576 с.

107. Воронін А.Н. Векторна оптимізація динамічних систем / А.М. Воронін, Ю.К. Зіатдінов, О.І. Козлов, В.С. Чабанюк, за ред. А.М. Вороніна. – К.: Техніка. 1999. – 284 с.

108. Гончаренко А.В. Вибір оптимальної комерційної швидкості транспортного судна. Науковий вісник ХДМІ. – 2010. – № 1 (2). – С. 41-49.

109. Чипашвили Ш.Ш. Некоторые вопросы создания единого кода семантики информации. Проект «Интерсемантика». Искусственный интеллект. – 2000, № 3 – С. 578-583.

110. Марков А.А. Теория алгорифмов. Труды Матем. инст. АН СССР им. В.А.Стеклова. АН СССР, Вып 113. – М.: Наука, 1970. – С. 39-72.

111. Мартынов В.В. Китайская семантика в системе исчисления примитивов. Пути Поднебесной. Сб. науч. тр. – Минск, 2006. – Вып.1. – С. 131-151.

112. Мартынов В.В. Основы семантического кодирования. Опыт представления и преобразования знаний. – Минск ЕГУ. 2001. – 140 с.

113. Дорогань О.И. Оценка качества программного обеспечения для мониторинга и управления автономными электроэнергетическими системами / О.И. Дорогань, В.М. Рябенский, А.О. Ушкаренко // Проблеми інформаційних технологій. – Херсон: ХНТУ, 2013. – № 2 (014). – С. 90–98.

114. Рябенский В.М. Структура спеціалізованого програмного забезпечення для керування автономними електроенергетичними установками / В.М. Рябенский, О.О. Ушкаренко, О.І. Дорогань // Вестник ХНТУ. – Херсон, 2012. – №1(44). – С. 113-116.

115. Баранов Г.Л. Інтеграція інформаційних технологій на транспорті. Навчальний посібник / Г.Л. Баранов, С.А. Банішевський, В.Л. Міронова, Д.В. Пасечник. – К.: НТУ, 2009. – 197 с.

116. Баранов Г.Л. Інформаційно-аналітичне забезпечення інтелектуальних систем (інтеграція інформаційних технологій на транспорті): монографія / Г.Л. Баранов, С.А. Банішевський, В.Л. Міронова, Д.В. Пасечник. – К.: НТУ, 2009. – 197 с.

117. Шурыгин В.А. Основы конструктивного математического анализа. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 328 с.

118. Зюбин В.Е. Программирование информационно-управляющих систем на основе конечных автоматов: учебное пособие. – Новосибирск: Новосибир. гос. ун-т, 2006. – 96 с.

119. Шалыто А.А. Switch-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. – СПб: Наука, 1998. – 628 с.

120. Воронін А.Н. Многокритеріальний синтез динамічних систем. – Київ: Наукова думка, 1992. – 160 с.

121. Машков О.А., Барабаш О.В. Синтез структури автоматизованої системи по критерію максимуму функціональної стійкості. Аерокосмічні системи моніторингу та керування. – К.: НАУ, 2003, т.2. – С. 193-196.

122. Тихонов І.В. Структурний аналіз складних динамічних систем траєкторного руху об'єктів водного транспорту / Г.Л. Баранов, І.В. Тихонов, Г.Г. Соболевський. Водний транспорт. Збірн. наук. праць КДАВТ, 2014. – Вип. 1 (19). – С. 71–79. – ISSN 2226-8553.

123. Доронін В.В. Системна технологія розв'язку оперативних задач навігації для синтезу законів експлуатації водного транспорту. Системи обробки інформації, № 10 (135), 2015. – С. 186-191.

124. Тихонов І.В. Постановка завдання щодо руху об'єктів в неоднорідному середовищі і шляхи його вирішення при експлуатації засобів водного транспорту / Д.М. Гудков, І.В. Тихонов // Збірник наукових праць

Харківського університету Повітряних сил. – Х.: ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2016. – Вип 1 (46). – С. 112-116. ISSN 2073-7378.

125. Иваненко В.И., Лабковский В.А. Проблема неопределенности в задачах принятия решений. - К.: Наукова думка, 1990. – 136 с.

126. Самохвалов Ю.Я. Групповой учет относительного превосходства альтернатив в задачах принятия решений. Кибернетика и системный анализ. – 2003. – № 6. – С. 141-145.

127. Портнягин Н.Н. Теория, методы и эксперименты решения задач диагностики судовых электрических средств автоматизации / Н.Н. Портнягин, Г.А. Пюкке. – СПб.: Судостроение, 2004. – 162 с.

128. Даниловский А.Г. Разработка моделей и методов обоснования технических решений по судовым энергетическим установкам: автореф. ... докт. техн. наук: 05.08.05. – СПб.: СПбГМТУ, 2010. – 38 с.

129. Дорогань О.И. Оптимизация структуры средств автоматизации судовых электроэнергетических систем. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, 2013. – № 18 (991). – С. 82–87.

130. Гончаренко А.В. Аналіз гвинтової характеристики двигуна 5 ДКРН 70/226,8 за питомою витратою палива. Науковий вісник ХДМІ. – 2009. – № 1 (1). – С. 16-24.

131. Мясников Ю.Н. Надежность и техническая диагностика судовых энергомеханических систем. - СПб.: Издательство Федерального госуд. унитарного предприятия “Центральный научно-исследовательский институт им. акад. А.Н. Крылова”, 2008. – 183 с.

132. Субботин С. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания образов / С. Субботин и др. // Харьков, 2012. – 318 с .

133. Ивановский В.Г. Особенности мониторинга и диагностики рабочего процесса судовых среднеоборотных дизелей программно-аппаратным комплексом D4.0H / В.Г. Ивановский, Р.А. Варбанец // Науковий вісник ХДМІ. – 2009. – № 1 (1). – С. 153-160.

134. Варбанец Р.А. Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.03. – Одесса: ОНМА, 2010. – 39 с.

135. Зельский Я.О., Унгаров Д.В., Онищенко О.А. Побудова суднової електроенергетичної системи із застосуванням електрохімічних накопичувачів енергії. Матер. наук.-техн. конф. молодих дослідників "Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт". – Одеса: ОНМА, 17.12.2015. – 256 с. – С. 127-133.

136. Кулинич Ю.М. Духовников В.К. Активный компенсатор реактивной мощности как средство улучшения качества потребляемой энергии. Транспорт Российской Федерации, № 3 (28), 2010, с. 38-40

137. Григорьев А.В. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: монография / А. В. Григорьев, В. А. Петухов. - СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. - 176 с.

138. Григорьев А.В., Зайнуллин Р.Р. Анализ режимов эксплуатации судовых валогенераторных установок с преобразователями частоты и синхронными компенсаторами. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 3, 2015, с. 164-171

139. Budashko V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes / V. Budashko, V. Nikolskyi, O. Onishchenko, S. Khniunin / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 3. – № 8(81). – P. 10 – 21. Doi:10.15587/1729-4061.2016.72543.

140. Григорьев А.В., Зайнуллин Р.Р. Судовые валогенераторные установки нового поколения на базе обратимых полупроводниковых преобразователей. Морской вестник. - 2013. - № 2 (11). - С. 36–38.

141. Гончаренко А.В. Дослідження характеристики двигуна стосовно зміни оптимальних значень. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2009). 36. наук. праць у 5-ти томах, 25-27 травня 2009 р. Матер. Міжн. наук.-практ. конф.. – Том 4. – Херсон: Видавництво Херсонського державного морського інституту, 2009. – С. 45-48.

142. Lukutin B.V. Ways of decrease in fuel consumption of diesel power station / B.V. Lukutin, E.B. Shandarova. Modern problems of science and education. Moscow: Academy of natural science, 2013, №2, pp. 1-4.

143. Ершов Ю.Л., Палютин Е.А. Математическая логика: учебное пособие. 3-е, стереотип. изд. - СПб.: Лань, 2004. - 336 с.

144. Фреге Г. Логика и логическая семантика: Сборник трудов. – М.: Орбита, 2000. - 343 с.

145. Гамма Э. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влиссидес. – СПб: Питер, 2001. – 368 с.

146. Згуровский М.З., Панкратова Н.Д. Системний аналіз, проблеми, методологія, приложение. - К.: Наукова думка, 2005. – 743 с.

147. Спицнадель В.Н. Основы системного анализа: учебное пособие. – СПб.: Изд. дом «Бизнес-пресса», 2000. – 326 с.

148. Бесекерский В. А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. 4-е изд. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 751 с.

149. Коваленко І.І. Вступ до системного аналізу / І.І. Коваленко, П.І. Бідюк, О.П. Гожий. – Миколаїв: МДГУ ім. Петра Могили, 2004. – 146 с.

150. Харченко С.Л. Язык проектирования технического задания системы управления. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2011. – №3(49). – С. 10-16.

151. Калабеков Б.А., Мамзелев И.А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы. - М.: Радио и связь , 1987. - 400 с.

152. Мазур О.М., Обнявко Т.С., Онищенко О.А. Уточнення поняття "ефективність експлуатації" багатоцільового судна допоміжного флоту. Х-та Міжн. наук.-техн. конф. "Іновації в суднобудуванні та океанотехніці", 26-28 вересня 2019 року. Т.1, с. 92-97. - Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова.

153. Коротнян Р.В., Унгаров Д.В., Онищенко О.А. Підвищення ефективності функціонування суднової системи енергопостачання. Матер. наук.-

техн. конф. молодих дослідників "Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт", 2019/11/21, с. 292-294, Одеса: НУ "ОМА".

154. Колпаков О.С., Онищенко О.А. Підвищення ефективності функціонування автостернового морського судна. Матер. наук.-техн. конф. молодих дослідників "Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт", 2019/11/21, с. 295-296, Одеса: НУ "ОМА".

155. Мельник А., Онищенко О. Оцінювання ефективності діяльності транспортних підприємств. Матер. конф. "Сучасні детермінанти розвитку бізнес-процесів в Україні", 2017, с. 311-314, Київ: Київський національний університет технологій та дизайну.

156. Будашко В.В., Онищенко О.А. Концепция моделирования и построения электроэнергетической установки современного судна. Оптимальное управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок: зб. праць наук. семінару НАН України (Військова академія, м. Одеса), с. 109-115. – Одеса: Наука і техніка, 2015. ISBN 978-966-1552-63-9.

157. В.О.Никифоров, О.В.Слита, А.В.Ушаков Интеллектуальное управление в условиях неопределенности - Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2011. - 226 с.

158. Микони С.В. Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив / С.В. Микони. - СПб.: Лань, 2009. – 272 с.

159. Баранов Г.Л. Оптимізація траєкторного управління та безпеки руху об'єктів наземних транспортних засобів на базі структурного аналізу складних динамічних систем / Г.Л. Баранов, В.Л. Міронова, О.М. Прохоренко // Управління проектами, системний аналізі логістика, № 12. – Київ, НТУ, 2013. – С.7-16.

160. Розенфельд А.И. Тезисы к общей теории полезности экономического поведения. - К.: Экономика Украины, 2007, № 10. - С. 45-51

161. Paul J. Shoemaker. The Expected Utility Model: Its Variants, Purposes, Evidence and Limitations. Journal of Economic Literature, 1982, pp. 529-563.

162. Tversky A., Kahneman D. Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty, 1992, pp. 297-323.

http://cemi.ehess.fr/docannexe/file/2780/tversky_kahneman_advances.pdf.

163. Машков О.А., Усаченко Л.М. Новые подходы к построению функционально устойчивых сложных динамических систем. Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2008. – Вип. 4 (8). – С. 68-72.

164. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб. Политехника, 2000. – 210 с.

165. Обідін Д.М. Забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем / Д.М. Обідін, О.В. Барабаш, Б.В. Дурняк, О.А. Машков // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць. – К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2012. – Вип. 64. – С. 36-41.

166. Барабаш О.В. Функціональна стійкість – властивість складних технічних систем. Збірник наукових праць НАОУ, № 40, 2012. – С. 225-229.

167. Дьяков А.Ф. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем / А.Ф. Дьяков, Н.И. Овчаренко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 336 с.

168. Николайчук О.И. Системы малой автоматизации / О.И. Николайчук. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 256 с.

169. Дорогань О.И. Системные принципы разработки контроллеров автоматизации для автономных электроэнергетических систем. Електротехніка і електромеханіка: Матер. Міжн. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, молодих вчених. – Миколаїв: НУК, 2010. – С. 48-49.

170. Рябенський В.М. Особливості використання автоматного програмування при розробці спеціалізованої SCADA-системи для автономних електроенергетичних установок / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко, О.І. Дорогань // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність. – Харків, 2012. – С. 155-159.

171. Milosevic M., Andersson G.. Generation Control in Small Isolated Power Systems, North American Power Symposium (NAPS), Ames, USA, 2005.

172. Swarup K.S., Mahesh U. Computerized data acquisition for power system automation. Power India Conference. – IEEE, 2006, pp. 6-17.

173. Грищенко В.Н. Методы и средства компонентного программирования / В.Н. Грищенко, Е.М. Лаврищева // Кибернетика и системный анализ. – Киев: Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, 2003. – №1.– С. 39-55.

174. Поликарпова Н.И. Автоматное программирование / Н.И. Поликарпова, А.А. Шалыто. – СПб.: Питер, 2009. – 176 с.

175. Занин И.В., Шопин А.Г. Эволюция SCADA и информационных систем производства. Автоматизация в промышленности. – М.: Издательский дом "ИнфоАвтоматизация", 2012. – №1. – С. 37-41.

176. Дорогань О.І. Комп'ютерна програма для розробки та забезпечення роботи в режимі реального часу систем моніторингу параметрів та керування автономними електроенергетичними установками "ElectronScada" // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 49935 – Держ. служба інтелект. власності України, 2013.

177. Дорогань О. И. Моделирование аппаратно-программных средств автоматизации электроэнергетических установок. Автоматика-2013. Матер. XX міжн. конф. з автоматичного управління. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 322.

178. ISO/IEC 25040:2011. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Evaluation process. – SC 7 System and Software Engineering, 2011. – 45 p.

179. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс: пер. с англ., 2-е изд. – М., - СПб., - К., 2006. – 1102 с.

180. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам: пер. с англ. – М.: КомКнига, 2005. – 248 с.

181. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и её применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир. 1976. – 167 с.

182. Яхьяева Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети. – М.: Интуит, 2012. – С. 316.

183. Дли М. И. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. Физматлит. - М., 2013. – С. 225.

184. Хакен Г.К. Информация и самоорганизация. – М.: Мир, 2011. – С. 46-48.

185. Харченко В.П. Прийняття рішень в соціотехнічних системах: монографія / В.П. Харченко, Т.Ф. Шмельова, Ю.В.Сікірда. – К.: НАУ, 2016. – 308 с. ISBN 978-966-932-010-0.

186. Тихонов І.В. Рациональний розподіл функцій в ергатичних системах навігації та управління рухом високошвидкісних транспортних засобів з метою гарантування підвищеного рівня безпеки у кризових ситуаціях / Г.Л. Баранов, В.Л. Міронова, Г.Г. Соболевський, І.В. Тихонов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних сил України. Наук.-техн. журнал Харк. унів. Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба Міністерства оборони України. – Харків: ХУПС, 2013. – Вип. 1(10). – С. 189-193.

186. Тихонов И.В. Системы динамического позиционирования судов как эргатический инструмент повышения безопасности мореплавания / Д.Н. Гудков, И.В. Тихонов, // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: Харк. унів. Повітряних сил ім. Івана Кожедуба, 2013. – Вип 8 (115). – С. 32-36.

187. Тихонов І.В. Поліергатичне гарантування якості систем навігації та управління рухом високошвидкісних транспортних засобів / Г.Л. Баранов, І.В. Тихонов, О.М. Прохоренко // Водний транспорт. Збірник наукових праць КДАВТ, 2013. – Вип. 3(18). – С. 26-34.

188. Благая Л.В., Павлова С.В. Математичні моделі діяльності людини-оператора в авіаційних ергатичних системах. Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій. – 2014. – Том 18.– С. 12-20.

189. Тихонов І.В. Інтелектуалізація полієргатичних систем навігації та управління рухом морськими танкерами-газовозами / Г.Л. Баранов, І.В. Тихонов, Г.О. Джиджула, В.Л. Міронова // Системи озброєння і військова техніка. Щокварт. наук журнал Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – Харків: ХУПС, 2013. – Вип. 2(34). – С. 59-63.

190. Мясников А.В. Study Guide "Теория организации". - М.: Московская финансово-промышленная академия, 2007. <https://u.to/efm-GA>.

191. Гамма Э. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влиссидес. – СПб.: Питер, 2001. – 368 с.

192. Баранов Г.Л. Способность контроля функциональной устойчивости сложных динамических систем / Г.Л. Баранов, В.Р. Косенко // Проблемы транспорта: ЗНП. Вып.8. – К.: НТУ, 2011 – С.115-118.

193. Баранов Г.Л. Структурное моделирование сложных динамических систем / Г.Л. Баранов, А.В. Макаров. – К.: Наук. думка, 1986. – 272 с.

194. Чернышов В.Н., Чернышов А.В.. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 96 с. – ISBN 978-5-8265-0766-7.

195. Коваленко И.И. Моделирование модульных систем с применением дискретной теории паттернов / И.И. Коваленко, О.А. Кудин // Системные исследования и информационные технологии. – Киев: ВПК «Политехника», 2009. – №2. – С. 78- 91.

196. Олзоева С.И. Распределенное моделирование в задачах разработки АСУ. – Улан-Удэ, 2005. – 209 с.

197. Баранов А.П., Раимов М.М. Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации. - СПб.: Элмор, 1997. – 232 с.

198. Dullens F.P.M. Modeling and Control of a Controllable Pitch Propeller / F.P.M. Dullens. – Master's thesis, Dep. Mechanical Eng., Dynamics and Control Group, Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands, 2009.

199. Хижняков Ю.Н. Автоматизация автономных многоагрегатных электростанций на основе релейно-импульсных и нечетких регуляторов с применением нейронной технологии: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Пермь, 2011. – 33 с.

200. Карандашов Ю.С. Исследование режимов и разработка метода определения расчётных нагрузок судовых электростанций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. СПб. гос. морск. техн. ун-т. – СПб., 2004. – 18 с.

201. Hatzilau I.K. On electric load characterization and categorization in ship electric installations / I.K. Hatzilau, G.J. Tsekouras, J.M. Prousalidis, I.K. Gyparis // IEEE Transactions on Power Systems. – IEEE: Piscataway, 2007. – №3. – P. 1120-1128.

202. Обеспечение надежности судовых дизелей на эксплуатационных и особых режимах работы / М.А. Малиновский, А.А. Фока, В.И. Ролинский, Ю.З. Вахрамеев. – Одесса: Феникс, 2007. – 149 с.

203. Костюченков Н.В. Эксплуатационные свойства мобильных агрегатов / Н. В. Костюченков, А. М. Плаксина. – Астана: КАТУ им. С. Сейфуллина, 2010. – 204 с.

204. Баранов Г.Л. Телекоммуникационные технологии на транспорте / Г.Л. Баранов, П.Р. Левковець. – К.: НТУ, 2007. – 448 с.

205. Карта технічного рівня та Держстандарти якості продукції.
<http://techtrend.com.ua/index.php?newsid=26002070>

206. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб.: Питер, 2005, 479 с.

207. Бишоп, Роберт Х.. Мехатроника: Введение, CRC Press, 2005, ISBN 420037242.

208. Borutzky, Wolfgang, Bond Graph. Методология, Springer, 2009, ISBN 1848828829.

209. Brandt Felix, Conitzer Vincent, Endriss Ulle, Lang Jérôme, Procaccia Ariel D. Handbook of Computational Social Choice, 2016. Cambridge University Press. ISBN 9781107060432.

210. Обнявко Т.С., Онищенко О.А. Визначення ефективності тендерних проектів у військовій економіці методами економетрики. Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія “Економічні науки”, № 9, Ч. 2, 2014. – С. 212-218

211. Триханов А.В. Теория автоматов: – Томск: Изд. ТПУ, 1999. - 103 с.

212. Способы задания цифровых автоматов. Задание цифровых автоматов на начальных языках: язык граф схем алгоритмов и язык логических схем алгоритмов. <https://studfile.net/preview/2910575/page:2/>.

213. Шалыто А.А. Использование граф-схем и графов переходов при программной реализации алгоритмов логического управления. Автоматика и телемеханика, 1996, № 7, с. 144-169; Autom. Remote Control, pp. 1027-1045.

214. Суховаров К.Д. Методика расчета "Оптимальная нагрузка" на оператора видеонаблюдения. Международный опыт. Вестник Томского института повышения квалификации работников ФСИН, 2019, 2(2), с. 63-68. eISSN: 2686-7893.

215. Багрецов С.А., Бондаренко А.В., Обносков Б.В. Квалиметрия групповой деятельности операторов сложных систем управления. - М.: Физматлит, 2006, 386 с. ISBN 5-9221-0697-X

216. Балл Г.О., Медінцев В.О. Процеси з патернами рефлексії: теоретико-множинний опис. Технології розвитку інтелекту. 2016. Том 2, №7 (12). URL: <http://goo.gl/dFASUu>.

217/ Балл Г.А., Мединцев В.А. Теоретико-множественный метод описания процессов и его применение в психологии: монография. – К.: Педагогічна думка, 2016. – 88 с. ISBN 978-966-644-424-3

218. Таран Т.А., Шемаев В.М. Математическое моделирование рефлексивного управления. Системні дослідження та інформаційні технології. 2005, № 3. - С. 114–131.

219. Котов А.І. Семантичні мережі як компонент уніфікованої моделі подання знань в інтелектуальних системах. Технологічний аудит і резерви виробництва, № 5/2(7), 2012, с. 21-22.

220. Roussopoulos N.D. A semantic network model of data bases. - TR, № 104, Department of Computer Science, University of Toronto, 1976, p. 212.

221. Субботін С.О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: навчальний посібник. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. - 341 с.

222. Грэхем И. Объектно-ориентированные методы. Принципы и практика, "Вильямс", 2009..<http://www.rsdn.ru/article/patterns/oomethods.xml>.

223. Minsky Marvin. A Framework for Representing Knowledge, in: Patrick Henry Winston (ed.), The Psychology of Computer Vision. McGraw-Hill, NY, 1975, p. 310.

224. Minsky Marvin. A framework for representing knowledge. MIT AI Laboratory Memo 306, June, 1974, pp. 112-131.

225. Минский М. Фреймы для представления знаний. - М.: Мир, 1979. - 223 с.

226. Дьяконов В.П., Борисов А.В. Основы искусственного интеллекта. Смоленск, 2007. - 310 с.

227. Бейтсон Г. Экология разума. - М.: Смысл, 2000. - 476 с.

228. Мараховский В.Б., Розенблюм Л.Я., Яковлев А.В. Моделирование параллельных процессов. Сети Петри. Курс для системных архитекторов, программистов, системных аналитиков, проектировщиков сложных систем управления. - СПб: Проф. литература, АйТи-Подготовка, 2014. - 400 с.

229. Zaitsev D.A. Toward the Minimal Universal Petri Net, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2013, pp. 1-12.

230. Адаменко А., Кучуков А. Логическое программирование и Visual Prolog (с CD). - СПб.: БХВ-Петербург, 2003, 390 с., ISBN 5-94157-156-9.

231. Robert Kowalski Predicate Logic as Programming Language Memo 70, Department of Artificial Intelligence, Edinburgh University. 1973, p. 320.

232. Карпов Ю.Г. Теория автоматов. - СПб: БХВ-Петербург, 2002, 213 с.
233. Хопкрофт Дж., Мотвани Р., Ульман Дж. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. - М.: Наука, 2002, 341 с.
234. Харари Ф. Теория графов. - М.: УРСС, 2003, - 300 с., ISBN 5-354-00301-6.
235. Оре Ойстин. Теория графов. - М.: УРСС, 2008, 352 с., ISBN 978-5-397-00044-4.
236. Игошин В.И. Математическая логика и теория алгоритмов, 2-е изд., стереотип.. - М.: Издательский центр «Академия», 2008, 448 с
237. Кузнецов О.П. Дискретная математика для инженера. - СПб.: Лань, 2007, 394 с.
238. Романенко В.В. Результатные выражения. Интернет-ресурс: (rfplus/chap 131-160); <http://ilt.kharkov.ua/bvi/rf/doc/romanenko/rfplus/chap131.html>.
239. Дунаев В.В. Базы данных. Язык SQL. - СПб.:БХВ-Петербург, 2006, 288 с. ISBN 978-5-94157-823-8.
240. Functional Programming In JavaScript - With Practical Examples (Part 1, 2). Интернет ресурс: <https://u.to/NtTBGA>; <https://medium.com/@rajaraodv>.
241. Дейкстра Э. Дисциплина программирования (перевод на рус.), Интернет-ресурс: <https://u.to/Ut3BGA>.
242. Gardner C. Networked Intelligent Instrumentation & Control for Switchboards / C. Gardner, D. Johnson, J. Provine // Electric Ship Technologies Symposium. – USA, 2007. – P. 510-518.
243. Назаров Н. Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. - М.: ВШ, 2002. - 348 с., ISBN 5-06-004070-4.
244. Заляжных В.В. Критерий трёх сигм. Интернет-ресурс: <http://arhiuch.ru/st3a.html>.

245 Gurland, J; Tripathi RC (1971). A simple approximation for unbiased estimation of the standard deviation. American Statistician (American Statistical Association), 25 (4): 30-32. JSTOR 2682923. doi:10.2307/2682923.

246. Barde M. (2012). What to use to express the variability of data: Standard deviation or standard error of mean?. Perspect Clin Res. 3 (3): 113–116. doi:10.4103/2229-3485.100662.

247. Таблиці функцій Лапласа. Інтернет-ресурс: <http://igriki.narod.ru/laplastable.htm>.

248. W M.C. Foulkes, L.Mitas, R.J. Needs and G. Rajagopal. Quantum Monte Carlo simulations of solids, Reviews of Modern Physics, 73, 2001, p. 33.

249. Салихов В.А. Типовые промышленные технологии: учебное пособие. 2-е изд. перераб. - М.; - Берлин: Директ-Медиа, 2018, 176 с. ISBN 978-5-4475-9494-7.

250. Хижняков Ю.Н. Комбинированный метод управления параллельной работой генераторов переменного тока. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1999. – 114 с.

251. Самулеев В.И. Сравнительный анализ методов расчета мощности судовой электростанции / В.И. Самулеев Т.Н. Гусакова, В.П. Елифанов / ФГБОУ ВО «ВГУВТ» Секция XVI. Электрооборудование объектов водного транспорта, 2015. - С. 191-199.

252. K. Zinner Aufladung von Verbrennungsmotoren. Наддув двигателей внутреннего сгорания. Пер. с немец. / под ред. д.т.н., Н.Н. Иванченко. - Л.: Машиностроение, 1978. - 264 с.

253. Медведев В.В. Методы обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок на основе имитационного моделирования: диссертация ... доктора технических наук : 05.08.05 / Медведев Валерий Викторович.- Санкт-Петербург, 2010.- 540 с.: ил.

254. Конаков, Г.А. Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация флота: под общ. ред. Г.А. Конакова: учеб. Для вузов водн. трансп. / Г.А. Конаков, Б.В. Васильев. – М. : Транспорт, 1980. – 423 с.

255. Обеспечение надежности судовых тепловых двигателей на частичных нагрузках и особых режимах эксплуатации / М.А. Малиновский, А.А. Фока. – Одесса: Феникс-А, 2006. – 153 с.

256. Толшин, В.И. Автоматизация судовых энергетических установок : учеб. –/ В.И. Толшин, В.Л. Сизых. 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Консульт, 2003. – 304 с.

257. Tsekouras G. J. A new pattern recognition methodology for classification of load profiles for ships electric consumers / G. J. Tsekouras, I. K. Hatzilau, J. M. Prousalidis // Journal of Marine Engineering and Technology. – London, IMarEST, 2009. – № 14. – P. 45-58.

258. Будашко В.В. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу / В.В. Будашко, О.А. Онищенко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип.: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2014. – № 38 (1081). – С. 45-51.

259. ГОСТ 10448-80. Двигатели судовые, тепловозные и промышленные. Приемка. Методы испытаний. Интернет ресурс: <http://vsegost.com/Catalog/79/7915.shtml>.

260. Білий В.Н., Бузовський В.А. Суднові холодильні установки і системи кондиціювання повітря та їх експлуатація: метод. вказ. до вик. курс. роботи. – Одеса: ОНМА, 2010. – 50 с. Режим доступу: <https://www.twirpx.com/file/367916/>.

261. Awal Z.I. and Hasegawa K.. Analysis of marine accidents due to engine failure Application of Logic Programming Technique (LPT), Technical Information at the Journal of the Japan Institute of Marine Engineering (JIME), Vol. 50 (2015), No. 6, pp. 39-46

262. Загоруйко В.О., Голіков О.А. Суднова холодильна техніка. - К.: Наукова думка, 2002. -575 с.

263. Голіков О.А. Суднові системи кондиціювання повітря. - К.: Наукова думка, 2000. -222 с.

264. Правила технической эксплуатации судовых технических средств. РД 31.21.30 – 83. - М.: В/О Мортехинформреклама, 1984. - 388 с.

265. Hindren A. Saber, Ramzi R. Ibraheem Al-Barwari, Ziyad J. Talabany (2013). Effect of Ambient Air Temperature on Specific Fuel Consumption of Naturally Aspirated Diesel Engine, Journal of Science and Engineering, Vol. 1(1), 1-7.

266. Çolak I., Bayındır R., Sefa I., Demirbaşı Ü., Bal G.. Developing of a control unit for the parallel operation of AC generators, TPE'06 3rd International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, (2006). p. 134-137.

267. Пат. 82745 Україна, МПК (2006.01) H02M 1/08. Функціональна структура логіко-динамічного процесу синхронізації генератора з мережею / Дорогань О.І.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № u201300569 від 17.01.2013; Опубл. 12.08.2013. – Бюл. №15.

268. Emam, S.E.A., Automatic digital synchronization, International Conference on Electrical, Electronic and Computer Engineering, ICEEC'04, (2004). p. 778-784.

269. Пат. 82749 Україна, МПК (2006.01) H02M 1/08. Спосіб перетворення аналогових сигналів генератора в логіко-динамічному процесі його синхронізації з мережею / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Дорогань О.І., Бабак В.І.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № u201300575 від 17.01.2013; Опубл. 12.08.2013. – Бюл. №15.

270. Пат. 82750 Україна, МПК (2006.01) H02M 1/08. Функціональна структура процедури перетворення аналогового сигналу напруги в логіко-динамічному процесі контролю амплітуди та частоти / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Дорогань О.І.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № u201300576 від 17.01.2013; Опубл. 12.08.2013. – Бюл. №15.

271. Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем. НОУ "Центр подготовки кадров энергосистем", - СПб., 2015.

Інтернет-ресурс: <https://rza.org.ua/down/open/Avtomatika-energositsem--G-M--Pavlov--G-V--Merkurev.html>

272. Гайсаров Р.В. Режимы работы электрооборудования электрических станций и подстанций: Ч.1. Режимы работы синхронных генераторов и компенсаторов, 2015, ЮУрГУ.

Интернет-ресурс: http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/623/47623/23581?p_page=2.

273. Дмитриев В.И. Информационные технологии обеспечения безопасности судоходства и их комплексное использование (e-NAVIGATION) / В.И. Дмитриев. – М.: Моркнига. – 2013. – 175 с.

274. Guidelines for vessels with dynamic positioning systems. MSC.645. – ИМО, 1994. – 17 р.

275. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents: Incidents reported for 2007-2010 (DPSI 17-21). IMCA M 198, M 207, M 211, M 218. – IMCA, 2009-2012.

276. Павленко М.А. Системы поддержки принятия решений и задачи их эргономического проектирования / М.А. Павленко, В.Н. Руденко, П.Г. Бердник, Ю.В. Данюк // Військово-технічний збірник академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. - Львів: 2010. - Вип. 3. - С. 3-7.

277. Савенко О.Є. Теоретичне та експериментальне дослідження роботи багатогенераторної суднової електроенергетичної системи. Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2011. - № 3. - С. 58-62.

278. Савенко О.Є. Оптимізація роботи суднової електростанції з метою підвищення якості електроенергії. Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2013. - № 6. - С. 74-78.

279. Boveri, Alessandro & Silvestro, Federico & Gualeni, Paola. (2016). Ship electrical load analysis and power generation optimisation to reduce operational costs. 1-6. DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841422.

280. Guzzella L., Onder C.H.. Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems. Springer, 2010.

281. Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. - М.: Наука, 1971. - 744 с.

282. Алексишин В.Г. Обеспечение навигационной безопасности плавания / В.Г. Алексишин, Л.А. Козырь, С.В. Симоненко. Учебное пособие. – Одесса: Феникс; М.: ТрансЛит, 2009. – 518 с.

283. Безпека об'єктів водного транспорту при застосуванні інтегрованих систем навігації і управління рухом суден / Г.Л. Баранов, І.В. Тихонов, В.Л. Міронова // «Автоматика-2012». Допов. XIX Міжн. конф. з автоматичного управління, 26-28 вересня 2012 рр. – К:НУХТ. – 2012. – С. 309-310.

284. Giddings I. Learning the Lessons, Reporting the Incidents/ Proc. Dynamic Positioning Conf., October 9-10, 2012.

285. Тихонов І.В. Комплексна інтеграція інформаційних процесів інтелектуальних транспортних систем для якісного гарантування безпечного руху у нестационарному середовищі / Г.Л. Баранов, І.В. Тихонов, Р.А. Габрук, В.Р. Косенко, О.М. Прохоренко // Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті. – К.: НТУ, 2015. – Вип. 3. – С. 85-95.

286. Вагущенко Л.Л. Судовые навигационно-информационные системы. Одесса, ЛАТСТАР, 2004. – 302 с.

287. Guidelines for vessels and units with dynamic positioning (DP) systems. MSC.1580. – IMO, 2017. – 21 p.

288. Dynamic Positioning Station Keeping Incidents: Incidents reported for 2013-2016 (DPSI 24-27). IMCA M 369, M 371, M 377, M 412. – IMCA, 2013-2016.

289. Haibo Chen, Torgeir Moan. Safety of Dynamic Positioning Operation on Mobile Offshore Drilling Units / H. Chen, T. Moan // July 2008. Reliability Engineering. System Safety 93(7):1072-1090. DOI: 10.1016/j.ress.2007.04.003

290. Машков О.А. Проблемы обеспечения функциональной устойчивости бортового информационно-управляющих комплексов авиационно-космической системы / О.А. Машков, О.А. Кононов // Збірник наук. праць КІВПС вип. 10. – К.: КІВПС. – 1999. – С. 60-66.

291. Тихонов І.В. Развитие системы комплексной электронной навигации “e-navigation” на мировом флоте в целях обеспечения безопасности су-

доходства. Водний транспорт. Збірник наук. праць КДАВТ. – К: КДАВТ, 2012. – Вип. 1(13). – С. 121-129.

292. Гагарский Д.А. Электронные картографические системы в современном судовождении: Учеб.-метод.пособие – Изд. 2-е. доп. – СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2007. – 124 с.

293. Тихонов І.В. Носовський А.М., Баранов Г.Л. Функціональна стійкість навігаційного обслуговування безпеки судноплавства на внутрішніх водних шляхах. Монографія. – К.: КДАВТ, 2012, 149 с.

294. Антонов В.А., Письменный М.Н. Теоретические вопросы управления судном. – Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2007. 78 с.

295. Вагущенко Л.Л. Современные информационные технологии в судовождении. - Одесса: ОНМА. 2013. – 135 с.

296. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. 2-е изд., перераб. и доп. – Одесса: Латстар, 2002. – 310 с.

297. Мальцев А.С. Теорія і практика безпечного управління судном при маневруванні: автореф. дис. ... д.т.н.: 05.22.13. - Одеса, 2007. - 36 с.

298. Острцов Г. Э., Клячко Л. М. Методы автоматизации управления движением корабля. – М.: Физматлит, 2009. 120 с.

299. Подпорин С.А. Развитие методов интеллектуального управления движением судна на курсе. – Дис. ... к.т.н.: 05.22.13. - Одесса, 2009. – 180 с.

300. Подпорин С.А. Нейронный управляющий контроллер в задаче автоматического управления судном на меняющемся курсе. Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, Вып. 19, 2011. – С. 156-165.

301. Гофман А.Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. – Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.

302. Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre. Propeller Design Charts. Varna, 1983. – 51 p.

303. Bakker, J.C. Dynamic behavior and nonlinear aspects of the controllable pitch propeller. Master's thesis, Technische Universiteit Delft, 2005.

304. Золотов С.С. Гидравлика судовых систем. – Л.: «Судостроение», 1970. – 240 с.
305. Харин В.М. Судовые гидравлические рулевые машины: учеб. пособ. – Одесса: Фенікс, 2005. – 280 с.
306. Perez T. Mathematical Ship Modeling for Control Applications. (Technical Report) / T.Perez, M.Blanke–DTU Technical University of Denmark, 2003. – 22 p.
307. Юдин Ю.И., Сотников И.И. Математические модели плоскопараллельного движения судна. Классификация и критический анализ. – Мурманск, 2006, 95 с.
308. Снопков В.И. Управление судном. – СПб.: Профессионал, 2004, 536 с.
309. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном. – Л.: Судостроение, 1983, 272 с.
310. Пипченко А.Д. Математическое моделирование динамики судна на базе искусственной нейронной сети. Судовождение: Сб. научн. трудов. Вып. 12. – Одесса: ИздатИнформ, 2006, с. 84-92.
311. Yoshimura Y. Hydrodynamic database and manoeuvring prediction method with medium high-speed merchant ships and fishing vessels. / Yoshimura Y., Masumoto Y. // International MARSIM Conference, 2012, pp. 494-503.
312. Kijima K., Tanaka S., Furukawa Y, Hori T. On a Prediction Method of Ship Manoeuvring Characteristics. Proc. of MARSIM-93, Vol.1, 1993, pp. 285-294.
313. Yasukawa H., Yoshimura Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. Journal of Marine Science & Technology. 2015, №20, pp. 37-52.
314. Golding B.K. Industrial Systems for Guidance and Control of Marine Surface Vessels. NNTU, 2004. – 111 p.
315. Isherwood R.M. Wind resistance of merchant ships. Transactions of Royal Institution of Naval Architects, 1973. Vol. 115, pp. 327-338.

316. The Manouvering Committee. Final Report and Recommendations to the 24th ITTC, 2005. – 62 p.

317. MAERSK SIRAC – Sea Trial results. Hyundai Heavy Industries. 2015. – 15 p.

318. Виткалов Я.Л. Исследование проблем синтеза нейросетевого контроллера в задаче управления курсом судна: автореф. дис. ... к.т.н.: 05.22.19. Владивосток, 2006. - 25 с.

319. Velagica J., Vukicb Z., Omerdicc E.. Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping. Control Engineering Practice 2003, № 11, pp. 433-443.

320. Седова Н.А. Интеллектуальная система автоматического управления курсом судна. Транспортное дело России. Спецвыпуск. 2006, № 7, с. 58-61.

321. Tomera M. Nonlinear controller design of a ship autopilot // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. 2010, Vol. 20, № 2, pp. 271-280.

322. Yaohua Hu, Suwu Xu. Generalized predictive controller design for ship track keeping. ICCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. 2010. Vol 9, № 5, pp. 236-239.

323. Ho-Young Lee, Sang-Sung Shin. The Prediction of ship's manoeuvring performance In initial design stage. Practical Design of Ships and Mobile Units. Elsevier Science, 1998. – 7 p.

324. Vichuzhanin V. Realization of a fuzzy controller with fuzzy dynamic correction. Central European Journal of Engineering. 2012, Vol. 2, № 3, pp. 392-398.

325. Odegard V. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models // Norwegian University of Science and Technology, 2009, pp. 100-107.

326. Юдин Ю.И., Пашенцев С.В. Идентификация математической модели судна. – М.: Моркнига, 2015. 141 с.

327. Ayulia Sitio Agisjaihc. An Analysis Nomoto Gain and Norbin Parameter on Ship Turning Maneuver. IPTEK, The Journal for Technology&Science. 2010. Vol. 21, № 2, pp. 307-309.

328. Wen-Hsien Ho, Chen-Huei Hsieh, Jyh-Horng Chou Optimal course handling control for nonlinear ship maneuvering system. International Journal of Innovative Computing, Information and Control ICIC, International. 2010, Vol. 6, № 10, pp. 114-117.

329. IMO MSC 76/23, “Resolution MSC.137 (76), Standards for Ship Manoeuvrability,” Report of the Maritime Safety Committee on Its Seventy-Sixth Session-Annex 6, 2002.

330. Шушляпин Е.А., Карапетьян В.А., Безуглая А.Е., Афонина А.А. Нелинейные регуляторы для удержания судна на заданной траектории при «сильных» маневрах // Труды СПИИРАН. 2017, Вып. 4(53), с. 178-200.

331. Zan Y. Research on Real-Time Simulation System of Ship Motion Based on Simulink. Open Mechanical Engineering Journal. 2014, Vol. 8, pp. 820-827.

ДОДАТКИ

**ООО «БЮРО
КОРАБЕЛЬНЫХ
ИНЖЕНЕРОВ»**
Украина, 65029, г. Одесса,
ул. Градоначальническая 4



**ТОВ «БЮРО
КОРАБЕЛЬНИХ
ІНЖЕНЕРІВ»**
Україна, 65029, м. Одеса,
вул. Градоначальницька 4

e-mail: office@nab-marine.com
nabmarine@gmail.com

tel: +38 (096) 674 10 25

web: www.nab-marine.com

АКТ

про практичне застосування результатів дисертаційних досліджень здобувача наукового ступеня Шевченка Валерія Анатолійовича

Цим актом підтверджується, що ряд результатів дисертаційної роботи Шевченка Валерія Анатолійовича «Удосконалення управління технічними системами та комплексами при експлуатації судна» використовуються при проектуванні та створенні сучасних суднових систем управління у ТОВ «БЮРО КОРАБЕЛЬНИХ ІНЖЕНЕРІВ»,

Зокрема, це:

- принцип автоматизованого управління судновою електростанцією, який відрізняється: а) урахуванням динаміки змінювання навантаження; б) використанням авторського методу "гнучких порогів" і який ураховує умови мінімуму витрати енергоресурсів та погодні умови, що дозволяє оптимізувати склад і завантаження генераторних агрегатів;
- методика синтезу та алгоритми підгонки частоти об'єктів, які потрібно синхронізувати, яка відрізняється адаптивним обчисленням випереджаючого імпульсу на включення генераторного автомата, що дозволяють оптимізувати процес синхронізації в детермінованих і стохастичних умовах, суттєво знизити зрівняльні струми;
- принцип швидкодійного вимірювання параметрів електроенергії генераторного агрегату, який відрізняється використанням методу мультиплікованій обробці дискретної і аналогової інформації гармонійних величин.

Члени комісії:

 Тіхонов М.В.

 Івшин І.Н.



www.nab-marine.com
office@nab-marine.com
+38 096 674 10 25
+38 098 219 82 56
+38 096 674 37 41

ООО «БЮРО КОРАБЕЛЬНЫХ ИНЖЕНЕРОВ»
Украина, г. Одесса, 65029,
ул. Градоначальническая, 4,
МФО 328704,
код ЕДРПОУ 39198050.

Профессиональные инженерные услуги в сфере морского и речного транспорта

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «СКМ МАРІН СЕРВІС»

65085, Україна, м.Одеса, вул.Просьолочна, буд 10-А
ПІН 408356215526 Код ЄДРПОУ 40835625
п/р № 26006630396400 в ПАТ «УкрСиббанк» МФО 351005 м.Київ
Телефон: +38 0979067030 Email:ckm.odessa@gmail.com

Вих. 289
Від. 24.12.2018

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
здобувача кафедри технічної експлуатації флоту

Національного університету «Одеська морська академія»

Шевченка Валерія Анатолійовича.

Цим актом затверджуються, що результати дисертаційних досліджень, які виконувались при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи “Підвищення ефективності, надійності і якості функціонування суднових енергетичних установок” (державний реєстраційний номер 0115U003582), впроваджені у виробничому процесі ТОВ «СКМ Марін Сервіс», а саме:

- під час настроювання параметрів систем управління судновими електроенергетичними установками з метою підвищення ефективності функціонування в умовах змінних навантажень;
- при виборі оптимальної конфігурації генераторних агрегатів у випадках суттєвої модернізації суден.

Директор ТОВ «СКМ Марін Сервіс»

Кісельов К.К.



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «СЕРВІС ТРАНС БАЛК»

*Україна, 67543, Одеська обл., Лиманський р., с. Визирка, вул. О. Ставниціра, б. 60, корп. 2, оф. 27
ідентифікаційний код 37804068*

АКТ

впровадження результатів дисертаційних досліджень здобувача наукового ступеня доктора технічних наук Національного університету «Одеська морська академія» Шевченка Валерія Анатолійовича

який засвідчує, що результати дисертаційних досліджень Шевченка В.А. в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи "Підвищення ефективності, надійності і якості функціонування суднових енергетичних установок" (державний реєстраційний номер 0115U003582), використані на суднах судноплавної компанії ТОВ «СЕРВІС ТРАНС БАЛК» при експлуатації та підвищенні ефективності функціонування електроенергетичних установок складної конфігурації у нормальних і аварійних умовах.

Практична значимість проведених дисертаційних досліджень зумовлюється запропонованою методикою побудови систем управління складних суднових технічних систем та комплексів, яка гарантує їх високу експлуатаційну ефективність, у тому числі – при експлуатації суден у складних умовах плавання.

Висновок.

1. Дослідження напрямків вдосконалення суднових електроенергетичних установок складної конфігурації є актуальними.

2. Результати дисертаційних досліджень Шевченка В.А. мають практичну цінність з точки зору підвищення надійності енергопостачання та ефективності використання палива.

3. Впровадження результатів дисертаційних досліджень Шевченка В.А. дозволять отримати вагомий економічний ефект у випадках:

- налагодження суднових систем управління різного рівня складності з позицій підвищення їхньої ефективності;
- їх використання при проектуванні нових моделей електроенергетичних установок;
- їх застосування при розробці систем керування судновими електроенергетичними установками.

Директор ТОВ «СЕРВІС ТРАНС БАЛК»



Д.С. Дорохін



Приватний
вищий навчальний заклад
«Інститут післядипломної освіти»
«ОДЕСЬКИЙ МОРСЬКИЙ ТРЕНАЖЕРНИЙ ЦЕНТР»

Україна
65026 Одеса, вул. Пастера, 16
тел/факс (048) 723-49-50

18.10.2018

м. Одеса

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційних досліджень

Цим актом засвідчується, що у приватному вищому навчальному закладі «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» були впроваджені у навчальний процес для слухачів курсів підготовки суднових інженерів наступні результати дисертаційної роботи Шевченка Валерія Анатолійовича «Удосконалення управління технічними системами та комплексами при експлуатації судна»:

- методика налагодження параметрів систем управління судновими електроенергетичними установками з метою підвищення ефективності функціонування в умовах змінних навантажень;
- методика визначення оптимальної конфігурації генераторних агрегатів у випадках суттєвої модернізації суден;
- методика визначення часових затримок на пуск і відключення резервного генераторного агрегату в умовах нестачі або надлишку генерованої потужності, яка відрізняється гнучким визначенням затримок часу, що дозволяє уникнути передчасну зміну складу генераторних агрегатів.

З метою забезпечення навчального процесу підготовки суднових інженерів за участю Шевченка В.А. було видано з 2008 по 2019 р. наступні монографії та навчальні посібники, у яких використані результати дисертаційних досліджень здобувача: «Эксплуатация, обслуживание и ремонт двигателей MAN B&W-ME»; «Эксплуатация судового высоковольтного электрооборудования»; «Судовые автоматизированные механические установки»; «Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления»; «Техническая эксплуатация одно- и двухтопливных двигателей Wartsila-Sulzer»; «Судовое высоковольтное оборудование»; «Эксплуатация судовых технических комплексов с двигателями MAN B&W-ME»

Директор
«Приватного вищого навчального закладу «Інститут післядипломної освіти»
«Одеський морський тренажерний центр»
к.т.н., професор



Пашенко Ю. В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор

Національного університету

«Одеська морська академія»,

д.ю.н., професор

О. М. Шемякін

_____ 2019 р.



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Шевченка Валерія Анатолійовича на тему «Удосконалення управління
технічними системами та комплексами при експлуатації судна» у навчальному
процесі університету

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу університету Пархоменко М. М., декан факультету електромеханіки і радіоелектроніки, д.т.н., доцент Будашко В. В., декан судномеханічного факультету, к.т.н., професор Колегаєв М. О. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Шевченка Валерія Анатолійовича впроваджені у навчальний процес на відповідних факультетах:

- на факультеті електромеханіки та радіоелектроніки здобувач Шевченко Валерій Анатолійович є провідним викладачем дисципліни «Суднове високовольтне обладнання», яка викладається для бакалаврів спеціальності «Річковий та морський транспорт» спеціалізації «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики»; результати дисертаційних досліджень було використано під час розробки навчальної програми вищевказаної дисципліни відповідно до освітньо-професійної програми підготовки;

- на судномеханічному факультеті здобувач є провідним викладачем дисципліни «Електрообладнання суден», яка викладається для бакалаврів спеціальності «Річковий та морський транспорт» спеціалізації «Експлуатація судових енергетичних установок»; результати дисертаційних досліджень було використано під час розробки навчальної програми вищевказаної дисципліни відповідно до освітньо-професійної програми підготовки.

Начальник навчального
відділу

Пархоменко М. М.

Декан факультету електромеханіки
та радіоелектроніки, д.т.н., доцент

Будашко В. В.

Декан судномеханічного факультету,
к.т.н., професор

Колегаєв М. О.

ДОВІДКА

про використання і апробацію матеріалів дисертаційного дослідження на тему
"Удосконалення управління технічними системами та комплексами при
експлуатації судна" здобувача Шевченка В. А.

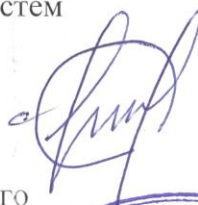
У Військовій академії (м. Одеса), що підпорядкована Міністерству оборони України, функціонує постійно діючий Науковий семінар Вченої ради Інституту електродинаміки Національної академії наук України "Оптимальне управління і експлуатація електроприводів спеціальних установок" з комплексної проблеми "Наукові основи електроенергетики".

У період з 2016 до 2020 року включно, здобувач Шевченко В. А. на засіданнях Наукового семінару Військової академії (м. Одеса) доповідав результати особистих досліджень з тематики енерго- та ресурсозбереженого управління та оптимізації режимів роботи суднових електроенергетичних систем та комплексів.

У результаті обговорення заслуханих доповідей, наукові результати дослідження Шевченка В. А. неодноразово отримували позитивну оцінку і схвалення учасників семінару. Зокрема, ці схвалення стосуються досліджень, що присвячені вирішенню актуальних проблем енергозбереження, дотриманню екологічних вимог при експлуатації морських суден, підвищенню ефективності експлуатації морських суден у тому числі подвійного призначення.

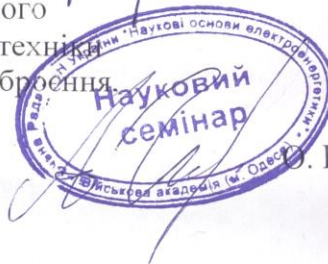
Апробація результатів дисертаційного дослідження проводилась у межах планових дослідницьких робіт кафедри електротехніки і систем ракетно-артилерійського озброєння та Наукового семінару Військової академії, де Шевченко В.А. приймав участь у виконанні окремих її етапів.

Заступник голови Наукового семінару
Військової академії (м. Одеса),
завідувач кафедри електротехніки і систем
ракетно-артилерійського озброєння,
кандидат технічних наук, працівник
Збройних сил України



А. БУКАРОС

Заступник ученого секретаря Наукового
семінару, професор кафедри електротехніки
і систем ракетно-артилерійського озброєння,
доктор технічних наук, професор,
працівник Збройних сил України



В. ГЕРЕГА

22.05.2020 р.



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА МОРСЬКОГО ТА РІЧКОВОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ
ІНСТИТУТ МОРСЬКОГО ФЛОТУ УКРАЇНИ" ДП «УкрНДІМФ»

65026, м.ОДЕСА, вул.ЛАНЖЕРОНІВСЬКА, 15А,
ЄДРПОУ 01126996 Тел.: (048)734-87-28, Факс (048) 734-87-27,
E-mail: UNII@UKR.NET



СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ
СЕРТИФІКОВАНА НА
ВІДПОВІДНІСТЬ ДСТУ ISO 9001-2009
Регістром судноплавства України

12 SEP 2019 № 1/1-256

на №

від

АКТ

впровадження результатів дисертаційних досліджень Шевченка В.А. на тему
«Удосконалення управління технічними системами та комплексами при
експлуатації судна»

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційних досліджень у рамках науково-дослідницької роботи «Методи і засоби підвищення ефективності функціонування та експлуатації перспективних суднових енергетичних установок» (державний реєстраційний №0117U005137), були використані та впроваджені в діяльність ДП "УкрНДІМФ" при проектуванні нових та удосконаленні існуючих систем управління судновими багатоагрегатними електроенергетичними установками (ЕЕУ) складних структур.

Практична значимість проведених дисертаційних досліджень зумовлюється тим, що запропонована дворівнева розподілена система управління судновою електроенергетичною установкою є універсальною та може використовуватись з електроенергетичними системами різних конфігурацій з урахуванням нормальних та аварійних режимів.

Відмінність запропонованої системи від існуючих полягає у використанні алгоритмів визначення оптимальної конфігурації та завантаження ЕЕУ з точки зору економічності із використанням авторського методу «гнучких порогів».

Враховуючі викладене по суті, було зроблено висновок, що подальші дослідження в цій області дозволять отримати економічний ефект від впровадження результатів дисертаційних досліджень Шевченка В.А. у випадках:

1. оптимізації за окремими критеріями суднових систем управління різного рівня складності з точки зору підвищення їх ефективності;
2. проектування багатоагрегатних електроенергетичних систем;
3. удосконалення існуючих систем управління СЕЕУ.

Директор

С.Б. Савінков