## Міністерство освіти і науки України Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

### Сокол Дмитро Вадимович

УДК 533.697.3

### ДИСЕРТАЦІЯ

Моделі та методи раціонального управління працездатністю вихрового енергороздільника

Спеціальність 173 Авіоніка

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і тестів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Сокол Дмитро Вадимович

Науковий керівник Кулік Анатолій Степанович, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор

Харків – 2023

#### АНОТАЦІЯ

Сокол Д. В. Моделі та методи раціонального управління працездатністю вихрового енергороздільника. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 173 «Авіоніка» (17 «Електроніка, автоматизація і електронні комунікації»). – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, 2023.

Дисертаційна робота присвячена актуальній задачі розробки раціональної системи управління вихровим енергороздільником в умовах невизначеності дестабілізуючих впливів за допомогою вирішення задач діагностування і відновлення працездатності. Об'єктом дослідження є процес діагностування і відновлення працездатності вихрового енергороздільника як об'єкта раціонального управління, схильного до дій дестабілізуючих впливів. Предметом дослідження є моделі, методи та засоби раціонального управління, що дозволяють встановлювати факт появи дестабілізуючого впливу, його місце, тип і фізичний вид.

Однією з сучасних розповсюджених нетрадиційних технологій перетворення енергії є спосіб, що базується на вихровому ефекті, який полягає у поділі стисненого газу на холодну та гарячу фракції. Серед напрямів використання вихрового ефекту можна виділити охолодження компонентів літака, роботу авіаційного вимірювача статичної температури, роботу вихрового гігрометра, систему протизледеніння лопаток статора газотурбінного двигуна, роботу автономного або шлангового кондиціонера, вентилюючий захисний костюм пілота, наземне терморегулювання та термостатування ракетнокосмічної техніки тощо.

В роботі представлений аналіз існуючих систем управління вихровим енергороздільником, описані конструктивні та функціональні особливості

вихрових енергороздільників, проведено аналіз використовуваних принципів управління працездатністю вихрового енергороздільника і типових підходів до формування їх математичного опису.

Проведено аналіз актуальних досліджень з розробки систем автоматичного управління вихровим енергороздільником (ВЕ). Основним недоліком цих досліджень є відсутність повного та адекватного опису процесів, що відбуваються всередині ВЕ. Експериментальні дослідження роботи системи автоматичної стабілізації температури, що сформована за допомогою принципу управління за відхиленням, вказують на існування факторів, які суттєво впливають на роботу системи. Застосування такого підходу до управління ВЕ як нелінійним об'єктом не є достатньо ефективним, оскільки виникає задача регулювання параметрів ВЕ. Також у разі появи дестабілізацій використання принципу управління за збуренням не дає можливість визначити місце та причину дестабілізації, а компенсація відбувається у малих діапазонах відхилення параметрів від їх номінального значення. Тому актуальною є науково-технічна задача з розробки раціональної системи управління ВЕ шляхом формування лінійних діагностичних моделей та алгоритмів діагностування і відновлення його працездатності.

Описано результати Computational Fluid Dynamics (CFD) моделювання процесу вихрового енергетичного поділу. Представлено результати обробки експериментальних характеристик вихрового енергороздільника для подальшої ідентифікації його математичної моделі.

Визначені структура та параметри математичної моделі вихрового енергороздільника як об'єкта автоматичного управління (ОАУ) за допомогою інтервальної лінеаризації та аналізу відомих експериментальних частотних характеристик.

Розроблена структура раціональної системи управління, що містить в собі ВЕ як об'єкт раціонального управління (ОРУ), модуль діагностики і модуль управління. Розроблено програмний модуль діагностики у вигляді лінійних діагностичних моделей раціональної системи управління ВЕ як ОРУ для послідовного зняття невизначеності та діагностування дестабілізуючих впливів.

Розроблено модуль управління у вигляді алгоритмів відновлення працездатності функціональних елементів ОРУ.

Розроблено модель раціональної системи управління ВЕ у середовищі Simulink, яке включає в себе модулі діагностики та управління, математичні моделі ВЕ як ОАУ.

Проведена серія обчислювальних експериментів з діагностування і відновлення працездатності функціональних елементів об'єкта раціонального управління, підданих різним видам дестабілізуючих впливів, методом комп'ютерного моделювання.

Представлені графіки свідчать про те, що розроблена раціональна система управління ВЕ оперативно і однозначно діагностує непрацездатні функціональні елементи ОРУ та ефективно парирує виявлені види дестабілізуючих впливів. Ефективність роботи раціональної системи управління оцінена за допомогою чисельних показників якості для різних дестабілізуючих впливів.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше розроблені лінійні діагностичні моделі вихрового енергороздільника як об'єкта раціонального управління, що відрізняються від відомих використанням структурних і параметричних особливостей нештатного функціонування вихрового енергороздільника, що дають можливість аналітично формувати алгоритми раціонального управління;

 вдосконалено метод структурно-параметричної ідентифікації за експериментальними частотними характеристиками керованих об'єктів, що відрізняється від відомих використанням похідних полінома, що дозволяє підвищити адекватність лінійного математичного опису;

– отримав подальший розвиток метод формування алгоритмів діагностування вихрового енергороздільника як об'єкта раціонального управління, що відрізняється від відомих використанням фрагментарних лінійних діагностичних моделей, що дозволяє спростити структуру алгоритмічного забезпечення процесу раціонального управління;

– отримав подальший розвиток метод формування алгоритмів відновлення працездатності функціональних елементів об'єкта раціонального управління, що відрізняються від відомих конкретизацією використання функціональних діагностичних моделей і засобів парирування дестабілізуючих впливів, що дозволяє розробляти ефективні алгоритми відновлення працездатності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами:

Моделі, методи та засоби раціонального управління розроблені на кафедрі систем управління літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» та використані у рамках науково-дослідної роботи на тему «Раціональне управління функціонуванням технічних систем з невизначеною динамікою» (ДР №0121U108867, 01.01.2021 — 31.12.2023 рр.) за науковим напрямком «Дослідження можливостей методів інтелектуального управління на прикладі різних технічних систем».

Практичне значення отриманих результатів:

 розроблені моделі та методи можуть бути використані у навчальному процесі на кафедрі систем управління літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»;

– використання принципу управління за діагнозом дозволяє реалізовувати системи управління вихровим енергороздільником, враховуючи невизначеності параметрів вихрового енергороздільника, які пояснюються недостатньою вивченістю природи вихрового ефекту, необхідністю зміни потоку газу в широкому діапазоні режимів та суттєвою залежністю потоку газу від зовнішніх умов функціонування; – розроблені моделі та методи є науково-методичною основою для забезпечення якісного відновлення працездатності вихрового енергороздільника. Використання моделей та методів дозволяє технічно обґрунтовано забезпечити необхідну безперервну роботу системи автоматичного управління вихровим енергороздільником шляхом введення в структуру системи відповідних алгоритмів та резервних ресурсів.

Наведено акти впровадження результатів дисертації у (додаток Б):

- навчальному процесі;
- науково-дослідній роботі;
- ДНВП «Об'єднання Комунар»;
- ТОВ «ЕС Інжинірінг».

Наукові положення і результати, викладені у дисертаційній роботі та винесені на захист, отримані особисто здобувачем. Серед них: аналіз існуючих систем управління вихровим енергороздільником і актуальних досліджень з розробки системи автоматичного управління вихровим енергороздільником; проведена ідентифікація математичної моделі вихрового енергороздільника як об'єкта автоматичного управління; розроблені лінійні діагностичні моделі і алгоритми відновлення працездатності вихрового енергороздільника як об'єкта раціонального управління.

Особисто **CFD** здобувачем розроблена модель вихрового енергороздільника, за результатами моделювання отримано сімейство статичних характеристик. Розроблена і реалізована у середовищі Simulink структура раціональної системи управління вихровим енергороздільником 3 моделюванням впливу дестабілізацій, розробленими модулем діагностики і модулем управління.

Основні наукові і практичні результати роботи оприлюднені і обговорені на конференціях: Всеукраїнській науково-технічній конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» (2017 р., 2018 р., 2019 р., м. Харків); Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (2019 р., м. Харків); Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (2020 р., м. Тернопіль); Міжнародна науково-практична конференція «Mathematical Modeling and Simulation of Systems» (2021 р., м. Чернігів).

Основні результати дисертації опубліковано в 11 працях, у тому числі у 4 статтях у професійних виданнях, 1 теза доповідей на конференції, яка включена до наукометричної бази Scopus, 1 стаття у журналі, яка включена до наукометричної бази Scopus.

Ключові слова: вихровий енергороздільник, динамічний об'єкт. автоматичне управління, математична модель, технічний стан, дестабілізуючий управління, раціональна система CFD модель, комп'ютерне вплив, моделювання, графічна лінеаризація, ідентифікація, лінійні діагностичні моделі, працездатність, діагностування, алгоритми, відновлення працездатності, дихотомічне дерево.

#### Перелік наукових праць здобувача за темою дисертації:

1. Сокол Д. В. Система автоматичного позиціонування положення дроселя у каналі керування стисненим повітрям системи кондиціювання. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017»: Збірник матеріалів конференції. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2017. – Т. 2. – С. 26.

2. Сокол Д. В. Переваги використання принципу управління за діагнозом для управління вихровим енергороздільником. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні», Харків, 20-23 листопад 2018 р. – Х., 2018. – Т. 2. – С. 11. 3. Пасічник С. М., Сокол Д. В. Вирішення задачі стабілізації температури повітря в кабіні транспортного засобу. Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2018. – Вип. 4. – С. 12-19. doi: 10.32620/aktt.2018.4.02.

4. Сокол Д. В. Використання амплітудно-частотних характеристик параметричної ідентифікації математичної моделі об'єкта управління з розподіленими параметрами. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф., Баку-Харків-Жиліна, 11-12 квітня 2019 р. – Х., 2019. – С. 8.

5. Кулік А. С., Сокол Д. В. Застосування ефекту Ранка-Хілша для управління вихровими енергороздільниками. Авіаційно-космічна техніка та технологія. – 2019. – Вип. 3. – С. 15-27. doi: 10.32620/aktt.2019.3.02.

6. Dmytro Sokol, Using frequency characteristics for structural-parametric identification of a mathematical model of control objects. Міжнародна науковопрактична конференція "Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering" ICTM-2019 («Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» ІКТМ-2019): Тези доп. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2019. – Том 1. – С. 105-108.

7. Сокол Д. В., Пявка Є. В. Використання полінома для структурнопараметричної ідентифікації математичної моделі об'єкта / Д. В. Сокол // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: матеріали 49-ї міжнар. наук. інтернет-конф., 10 червня 2020 р. – Тернопіль, 2020. – С. 27-30.

 Kulik A., Pasichnik S., Sokol D. Modeling of physical processes of energy conversion in small-sized vortex energy separator. Aerospace technic and technology. – 2021. – Вип. 1. – С. 20-30. doi: 10.32620/aktt.2021.1.03.

9. Kulik A., Pasichnik S., Sokol D. Investigation of stationary processes in vortex energy separator through its computational fluid dynamics model. Mathematical Modeling and Simulation of Systems. Selected Papers of 16th International Scientific-

practical Conference, MODS, 2021 June 28–July 01, Chernihiv, Ukraine. DOI: 10.1007/978-3-030-89902-8\_8.

10. Kulik A., Dergachov K., Pasichnik S., Sokol D. Diagnostic models of inoperable states of the vortex energy separator device. Aerospace technic and technology. – 2022. – no. 3(179), pp. 13-29. DOI: 10.32620/aktt.2022.3.02.

11. Kulik A., Dergachov K., Pasichnik S., Sokol D. Rational control of the temperature of vortex energy separator under destabilizing influence. Radioelectronic and Computer Systems, 2022, no. 3(103), pp. 47-66. DOI: 10.32620/reks.2022.3.04.

Наведені публікації містять результати безпосередньої роботи здобувача на окремих етапах дослідження, повною мірою відображають основні положення та висновки роботи. Авторська участь здобувача в опублікованих наукових працях погоджена зі співавторами.

#### ABSTRACT

Sokol D. V. Models and methods for rational control of a vortex energy separator. – A qualifying scientific work as a manuscript.

The thesis for a degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 173 "Avionics" (17 "Electronics, automation and electronic communications"). – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, 2023.

The dissertation is dedicated to a vital problem of development of a rational control system for the vortex energy separator under conditions of uncertainty by solving problems of diagnosing and restoring performance. The object of research is a process of diagnosing and restoring the vortex energy separator performance. The subject of research is models, methods and facilities of vortex energy separator rational control under conditions of uncertainty caused by destabilizing effects of various origins.

One of today's widespread non-traditional energy conversion technologies is a method based on the vortex effect, which consists in dividing compressed gas into cold and hot fractions. Among areas of vortex effect usage, it is possible to distinguish aircraft components cooler, an aviation static temperature meter, a vortex hygrometer, an anti-icing system of stator blades of a gas turbine engine, an autonomous or hose air conditioner, a ventilated pilot's protective suit, a ground temperature regulator, thermostating of rocket and space equipment, etc.

The work presents an analysis of existing control systems for the vortex energy separator, design and functional features of the vortex energy separator are determined, and an analysis of the used control principles for vortex energy separator efficiency and typical approaches to a mathematical description of the vortex energy separator is carried out.

An analysis of relevant research on development of the vortex energy separator automatic control systems has been carried out. The main shortcoming of these researches is the lack of a complete and adequate description of the processes taking place inside the vortex energy separator. Experimental studies of the operation of the automatic temperature stabilization system, formed using the deviation control principle, indicate the existence of factors that significantly affect the system operation. The application of such an approach to the control of the vortex energy separator as a non-linear object is not effective enough, since the problem of regulating the vortex energy separator parameters arises. Also, in the event of destabilizations, the use of the disturbance control principle does not allow determining the place and cause of destabilization, and compensation occurs in small ranges of parameter deviations from their nominal value. Therefore, the scientific and technical task of rational control system development of the vortex energy separator by forming linear diagnostic models and algorithms for diagnosing and restoring its performance is relevant.

The results of a Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation of the vortex energy separation process are presented.

The structure and parameters of the vortex energy separator mathematical model as an automatic control object are determined using interval linearization and analysis of known experimental frequency characteristics.

The structure of the vortex energy separator rational control system has been developed, which includes the vortex energy separator as a rational control object, a diagnostic module and a control module.

The diagnostic software module has been developed in the form of linear diagnostic models of the rational control system of vortex energy separator as the rational control object for the consistent removal of uncertainty and diagnosing destabilizing effects.

The control module has been developed in the form of algorithms for restoring the performance of the rational control object.

The model of the vortex energy separator rational control system has been developed in the Simulink environment, which includes diagnostic and control modules, mathematical models of the vortex energy separator as the automatic control object. A series of computational experiments was carried out to diagnose various types of destabilizing effects and restore the performance of the functional elements of the rational control object using computer modeling.

The presented graphs show that the developed rational control system of the vortex energy separator quickly and unambiguously diagnoses inoperable functional elements of the rational control object and effectively counters detected types of destabilizing effects. The effectiveness of the rational control system is evaluated using numerical quality indicators for various destabilizing effects.

The scientific novelty of the obtained results:

– for the first time, linear diagnostic models of the vortex energy separator as a rational control object have been developed, which differ from the known ones by using the structural and parametric features of abnormal functioning of the vortex energy separator, which makes it possible to analytically formulate rational control algorithms;

- the method of structural-parametric identification based on the experimental frequency characteristics of controlled objects has been improved, differing from the known one by using polynomial derivatives, which makes it possible to increase the adequacy of the linear mathematical description;

- the method of forming algorithms for diagnosing the vortex energy separator as a rational control object has been further developed, which differs from the known use of fragmentary linear diagnostic models, which makes it possible to simplify the structure of algorithmic support for the rational control process and improve performance;

- the method of forming algorithms for restoring the performance of functional elements of the rational control object has been further developed, which differs from the known one by specifying the use of functional diagnostic models and means of parrying destabilizing effects, which makes it possible to develop effective algorithms for performance restoration.

Practical significance of the obtained results:

 the developed models and methods can be used in the educational process at the Department of Aircraft Control Systems of the National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute";

- the use of control principle by diagnosis allows to implement control systems of the vortex energy separator, taking into account the uncertainty of the parameters of the vortex energy separator, which are explained by insufficient study of the nature of the vortex effect, the need to change the gas flow in a wide range of modes, and the significant dependence of the gas flow on external operating conditions;

– the developed models and methods are a scientific and methodical basis for ensuring the high-quality restoration of the efficiency of the vortex energy separator. The use of models and methods makes it possible to provide the necessary continuous operation of the automatic control system of the vortex energy separator in a technically justified manner by introducing appropriate algorithms and reserve resources into the system structure.

The acts of implementation of the dissertation results are given in Appendix B.

The scientific propositions and results presented in the dissertation and submitted for defense were obtained personally by the applicant. Among them: analysis of existing vortex energy separator control systems and relevant research on the development of vortex energy separator automatic control systems; identification of the mathematical model of the vortex energy separator as an automatic control object was performed; linear diagnostic models and algorithms for restoring the performance of vortex energy separator as a rational control object have been developed

The applicant personally developed the CFD model of vortex energy separator, based on the modeling results, a series of static characteristics was obtained. The structure of the vortex energy separator rational control system has been developed and implemented in the Simulink environment including modeling of influence of the destabilizing effects developed by the diagnostic module and the control module.

*Keywords:* vortex energy separator, dynamic object, automatic control, mathematical model, technical condition, destabilizing effect, rational control system,

CFD model, computer simulation, graphic linearization, identification, linear diagnostic models, performance, diagnosis, algorithms, performance restoration, dichotomous tree.

### 3MICT

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	18
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1	27
1.1. Пристрій та принцип дії вихрових енергороздільників	27
1.2. Застосування вихрових енергороздільників в авіації	36
1.3. Аналіз напрямів розробки систем управління процесом вихрового	
енергетичного поділу	38
1.4. Особливості математичного опису вихрового енергороздільника	44
1.5. Аналіз класичних принципів управління та особливості принципу	
управління за діагнозом	52
1.6. Постановка задач дисертаційного дослідження	58
Висновки до розділу 1	59
РОЗДІЛ 2	60
2.1. Графічна, фізична моделі та принцип дії вихрового енергороздільника	
як об'єкта автоматичного управління	60
2.1.1. Опис експериментальної установки на базі вихрового	
енергороздільника і його експериментальних характеристик	60
2.1.2. Розробка обчислювальної моделі гідродинаміки вихрового	
енергороздільника	63
2.2. Математичний опис номінального режиму функціонування вихрового	
енергороздільника як об'єкта автоматичного управління	67
енергороздільника як об'єкта автоматичного управління 2.2.1. Формування функціональної та структурної схем об'єкта	67
енергороздільника як об'єкта автоматичного управління 2.2.1. Формування функціональної та структурної схем об'єкта автоматичного управління	67 67
<ul> <li>енергороздільника як об'єкта автоматичного управління</li></ul>	67 67 74
<ul> <li>енергороздільника як об'єкта автоматичного управління</li></ul>	67 67 74
<ul> <li>енергороздільника як об'єкта автоматичного управління</li></ul>	67 67 74 79

РОЗДІЛ	87
3.1. Фо	ормування структури раціональної системи управління
3.2. Фо	ормування діагностичних моделей96
3.2.1.	Вирішення задачі виявлення дестабілізації
3.2.2.	Пошук місця дестабілізації
3.2.3.	Встановлення типу дестабілізації100
3.2.4.	Визначення виду дестабілізації110
3.2.5.	Формування дихотомічного дерева діагностування 116
Виснов	ки до розділу 3 119
<b>РОЗДІ</b> Л	[ 4
4.1. Oc	собливості відновлення працездатності об'єкта раціонального
управлі	ння
4.2. Bi	дновлення працездатності функціональних елементів об'єкта
раціона	льного управління
4.2.1.	Відновлення працездатності привода130
4.2.2.	Відновлення працездатності вихрового енергороздільника 133
4.2.3.	Відновлення працездатності датчиків температури 139
4.2.4	Аналіз можливості застосування розроблених алгоритмів
діагно	стування та відновлення працездатності при множинних
деста	білізуючих впливах145
Виснов	ки до розділу 4 147
<b>РОЗДІ</b> Л	5
5.1. Oi	пис елементів моделі раціональної системи управління у середовищі
Simulin	x
5.2. Bu	ютір інтервалів діагностування та допусків на відхилення 153
5.2.1.	Реалізація переходів по дереву діагностування 153
5.2.2.	Вибір інтервалів діагностування157
5.2.3.	Вибір допусків на відхилення 161

5.3. Комп'ютерне моделювання функціонування розробленої ра	аціональної
системи управління вихровим енергороздільником	163
5.3.1. Діагностування та відновлення працездатності привода	
5.3.2. Діагностування та відновлення працездатності вихрово	ГО
енергороздільника	
5.3.3. Діагностування та відновлення працездатності датчика	температури
холодного потоку повітря	171
5.3.4. Діагностування та відновлення працездатності датчика	температури
гарячого потоку повітря	175
Висновки до розділу 5	181
ВИСНОВКИ	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	
ДОДАТОК А. ДОДАТКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ Р	оботи
МОДЕЛІ РАЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ	196
ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ	

#### ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

- CFD Computational Fluid Dynamics;
- NaN Not-A-Number;
- RANS Reynolds-averaged Navier–Stokes (рівняння Нав'є-Стокса, усереднені за Рейнольдсом);
- АЧХ амплітудно-частотна характеристика;
- ВЕ вихровий енергороздільник;
- ЗВ засіб відновлення;
- КД кроковий двигун;
- ЛАЧХ логарифмічна амплітудно-частотна характеристика;
- М одиниця числа Маха;
- ОАУ об'єкт автоматичного управління;
- ОРУ об'єкт раціонального управління;
- ПРУ пристрій раціонального управління;
- САУ система автоматичного управління;
- u<sub>у</sub> управляюча напруга;
- Р<sub>ст</sub> тиск вхідного потоку стисненого повітря;
- $\mu_x$  масова доля холодного потоку повітря;
- ζ лінійне положення регулюючого вентиля;
- D множина дестабілізуючих впливів, діючих на об'єкт раціонального управління;
- Т<sub>х</sub> температура вихідного холодного повітря;
- T<sub>г</sub> температура вихідного гарячого повітря;

$$W_{np}(s) = \frac{Z(s)}{U_{y}(s)}$$
 – передавальна функція привода;

 $W_{ox}(s) = \frac{T_x(s)}{Z(s)}$  і  $W_{or}(s) = \frac{T_r(s)}{Z(s)}$  – передавальні функції вихрового

енергороздільника для каналів холодного та гарячого потоків повітря відповідно;

$$W_{dx}(s) = \frac{U_x(s)}{T_x(s)}$$
 і  $W_{dr}(s) = \frac{U_r(s)}{T_r(s)}$  – передавальні функції датчиків

температури холодного та гарячого потоків повітря відповідно.

#### ВСТУП

Обґрунтування вибору дослідження. Залача стабілізації теми температури холодного та гарячого потоків повітря, отриманого вихровим енергороздільником (ВЕ), є актуальною при розробці систем автоматичного управління (САУ), призначених для регулювання температури і парирування дестабілізуючих впливів. Останнім часом розробники багато уваги приділяють підвищенню ефективності температурного поділу за рахунок вдосконалення конструкції та вибору параметрів вхідного стисненого газу, що найбільше підходять для конкретного застосування. Огляд робіт вітчизняних та закордонних авторів свідчить про широкий спектр досліджень у напрямі розробки надійних та ефективних систем управління ВЕ різного типу.

Суттєві результати з питання формування математичної моделі ВЕ, яка дає можливість описати процес нагріву робочого тіла із різними теплофізичними параметрами, був запропонований Лабай В. Й., Савченко О. О., Желихом В. М. і Козак Х. Р. У роботах Shehzaib Yousuf Khan, Mohamadreza Mirjalili, Sangseok Yu та Smith Eiamsa-Ard процеси, що відбувається всередині ВЕ, моделюється за допомогою стаціонарної форми рівнянь нерозривності, імпульсу та енергії з подальшою побудовою (Computational Fluid Dynamics) CFD моделей BE за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса, усереднені за Рейнольдсом. Унікальний підхід до формулювання математичного опису ВЕ був запропонований Uluer O., Kirmaci V., Atas S. – як розрахунок характеристик нагріву та охолодження за допомогою штучних нейронних мереж. Проте питання парирування дестабілізуючих впливів при роботі системи управління ВЕ на цей момент в повному обсязі у науковій літературі не висвітлено, що й зумовлює актуальність дисертаційного дослідження.

Задача стабілізації температури потоків повітря, що виходять з ВЕ, є частиною важливої задачі стабілізованого функціонування системи управління ВЕ, необхідного їй для виконання поставлених вимог. У процесі експлуатації ВЕ

виникають ситуації, коли параметри вихідних потоків змінюються через небажані зміни умов експлуатації або внутрішніх несправностей системи управління. Це свідчить про необхідність парирування дестабілізуючих впливів та підтримки безперервного функціонування ВЕ. Маючи інформацію про дестабілізуючі впливи, що діють на ВЕ, а також про способи управління параметрами ВЕ, можна визначити умови, за яких можливою є розробка раціональної системи управління ВЕ. Саме цьому слід звернути увагу на те, як дестабілізації впливають на систему управління та якими засобами вони можуть бути парирувані.

Для успішного вирішення такої задачі доцільно застосувати методи математичного моделювання роботи ВЕ як об'єкта раціонального управління (ОРУ), враховуючи при цьому види дестабілізації, що впливають на нього, та засоби відновлення його працездатності. Широке застосування набули CFD пакети моделювання для дослідження фізичних процесів, що відбуваються всередині ВЕ. За наявності взаємозв'язків серед змінених параметрів ВЕ та за наявності способів їх управління доцільно використовувати діагностичні моделі відповідні відновлення алгоритми працездатності. Застосування та раціонального управління до BE дозволить діагностувати причини дестабілізуючих впливів та парирувати їх за рахунок наявних відновлювальних ресурсів при безперервній роботі системи, забезпечуючи працездатність у реальному масштабі часу.

Актуальність роботи. Однією з сучасних розповсюджених нетрадиційних технологій перетворення енергії є спосіб, що базується на вихровому ефекті, який полягає у поділі стисненого газу на холодну та гарячу фракції. Серед напрямів використання вихрового ефекту можна виділити охолодження компонентів літака, роботу авіаційного вимірювача статичної температури, роботу вихрового гігрометра, систему протизледеніння лопаток статора газотурбінного двигуна, роботу автономного або шлангового кондиціонера, вентилюючий захисний костюм пілота, наземне терморегулювання та термостатування ракетно-космічної техніки тощо. Вихровий ефект може бути нестабільним та непередбачуваним. У відомих дослідженнях відсутній повний та адекватний опис процесів, що відбуваються всередині ВЕ під час енергетичного поділу. Експериментальні дослідження роботи системи автоматичної стабілізації температури, що сформована за допомогою принципу управління за відхиленням, вказують на існування факторів, які суттєво впливають на роботу системи. Застосування такого підходу до управління ВЕ як нелінійним об'єктом не є достатньо ефективним, оскільки виникає задача регулювання параметрів ВЕ. Також у разі появи дестабілізацій використання принципу управління за збуренням не дає можливість визначити місце та причину дестабілізації, а компенсація відбувається у малих діапазонах відхилення параметрів Від їх номінального значення.

Таким чином, прикладна наукова задача, яка вирішується в дисертації, – розробка раціональної системи управління вихровим енергороздільником шляхом формування лінійних діагностичних моделей та алгоритмів діагностування і відновлення його працездатності – є актуальною.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка раціональної системи управління ВЕ як нелінійним об'єктом з невизначеністю, обумовленою дестабілізуючими впливами, за допомогою вирішення задач діагностування та відновлення працездатності.

#### Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

– провести аналіз існуючих систем управління ВЕ, визначити конструктивні та функціональні особливості ВЕ, провести аналіз типових підходів до формування математичного опису ВЕ;

– провести аналіз актуальних досліджень з розробки систем автоматичного управління BE;

– провести Computational Fluid Dynamics (CFD) моделювання процесу вихрового енергетичного поділу;

 визначити структуру та параметри математичної моделі ВЕ як об'єкта автоматичного управління (ОАУ) за допомогою інтервальної лінеаризації та аналізу відомих експериментальних частотних характеристик;

розробити структуру раціональної системи управління ВЕ, що містить
 в собі ВЕ як об'єкта раціонального управління (ОРУ), модуль діагностики та модуль управління;

 розробити алгоритмічне забезпечення модуля ВЕ як ОРУ для послідовного зняття невизначеності за допомогою діагностування причин дестабілізуючих впливів;

– розроблено модуль управління у вигляді алгоритмів відновлення працездатності ОРУ за допомогою використання різних резервних засобів;

розробити модель раціональної системи управління ВЕ у середовищі
 Simulink, яке включає в себе модулі діагностики та управління, математичні
 моделі ВЕ та апаратних засобів автоматизації;

 провести серію експериментів з діагностування різних видів дестабілізуючих впливів і відновленню працездатності функціональних елементів ОРУ методом комп'ютерного моделювання.

**Об'єктом дослідження** є процес діагностування і відновлення працездатності вихрового енергороздільника як об'єкта раціонального управління, схильного до дій дестабілізуючих впливів.

**Предметом дослідження** є моделі, методи та засоби раціонального управління, що дозволяють встановлювати факт появи дестабілізуючого впливу, його місце, тип і фізичний вид.

#### Методи дослідження.

Методи математичного і CFD моделювання застосовано для дослідження процесу вихрового енергетичного поділу. Для отримання статичних характеристик BE застосовано метод інверсного моделювання. Методи невизначених коефіцієнтів та диференціального числення застосовано для ідентифікації структури та параметрів математичної моделі BE. Метод управління за станом застосовано для розробки раціональної системи управління ВЕ. Для розробки комп'ютерної моделі раціональної системи управління ВЕ та отримання результатів експериментів застосовано метод комп'ютерного моделювання. Для розробки лінійних діагностичних моделей та алгоритмів відновлення працездатності застосовано методи теорії автоматичного управління та чисельні методи.

#### Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше розроблені лінійні діагностичні моделі вихрового енергороздільника як об'єкта раціонального управління, що відрізняються від відомих використанням структурних і параметричних особливостей нештатного функціонування вихрового енергороздільника, що дає можливість аналітично формувати алгоритми раціонального управління;

 вдосконалено метод структурно-параметричної ідентифікації за експериментальними частотними характеристиками керованих об'єктів, що відрізняється від відомих використанням похідних полінома, що дозволяє підвищити адекватність лінійного математичного опису;

подальший розвиток метод формування отримав алгоритмів діагностування вихрового енергороздільника як об'єкта раціонального управління, що відрізняється від відомих використанням фрагментарних лінійних діагностичних моделей, ЩО дозволяє спростити структуру алгоритмічного забезпечення процесу раціонального управління;

отримав подальший розвиток метод формування алгоритмів відновлення працездатності функціональних елементів об'єкта раціонального управління, що відрізняються від відомих конкретизацією використання функціональних діагностичних моделей і засобів парирування дестабілізуючих впливів, розробляти ефективні відновлення ЩО дозволяє алгоритми працездатності.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і результати, викладені у дисертаційній роботі та винесені на захист, отримані особисто здобувачем.

Серед них: аналіз існуючих систем управління ВЕ і актуальних досліджень з розробки САУ ВЕ; проведена ідентифікація математичної моделі ВЕ як ОАУ; розроблені лінійні діагностичні моделі і алгоритми відновлення працездатності ВЕ як ОРУ.

Особисто здобувачем розроблена CFD модель BE, за результатами моделювання отримано сімейство статичних характеристик. Розроблена і реалізована у середовищі Simulink структура раціональної системи управління BE з моделюванням впливу дестабілізацій, розробленими модулем діагностики і модулем управління.

Апробація матеріалів дисертації. Основні наукові і практичні результати роботи оприлюднені і обговорені на конференціях: Всеукраїнській науковотехнічній конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» (2017 р., 2018 р., 2019 р., м. Харків); Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (2019 р., м. Харків); Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (2020 р., м. Тернопіль); Міжнародна науково-практична конференція «Маthematical Modeling and Simulation of Systems» (2021 р., м. Чернігів).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано в 11 працях, у тому числі у 4 статтях у професійних виданнях, 1 теза доповідей на конференції, яка включена до наукометричної бази Scopus, 1 стаття у журналі, яка включена до наукометричної бази Scopus.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації двома мовами, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 93 найменувань на 11 сторінках і 2 додатків на 15 сторінках. Загальний обсяг роботи складає 210 сторінок, із них 165 сторінок основного тексту, 0 таблиць і 73 рисунки.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, результати яких викладено в дисертації, виконано на кафедрі апаратів Національного систем управління літальних аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» в рамках виконання науководослідних робіт держбюджетною темою «Раціональне за управління функціонуванням технічних систем 3 невизначеною динамікою» (ДР №0121U108867).

#### Практичне значення отриманих результатів.

Використання принципу управління за діагнозом дозволяє реалізовувати системи управління вихровим енергороздільником, враховуючи невизначеності параметрів вихрового енергороздільника, які пояснюються недостатньою вивченістю природи вихрового ефекту, необхідністю зміни потоку газу в широкому діапазоні режимів та суттєвою залежністю потоку газу від зовнішніх умов функціонування.

Розроблені моделі та методи є науково-методичною основою для забезпечення якісного відновлення працездатності вихрового енергороздільника. Використання моделей та методів дозволяє технічно обґрунтовано забезпечити необхідну безперервну роботу системи автоматичного управління вихровим енергороздільником шляхом введення в структуру системи відповідних алгоритмів та резервних ресурсів

26

#### РОЗДІЛ 1

# СТАН ПРОБЛЕМИ РАЦІОНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ВИХРОВИМ ЕНЕРГОРОЗДІЛЬНИКОМ

#### 1.1. Пристрій та принцип дії вихрових енергороздільників

Вихровий енергороздільник – це пристрій, який забезпечує поділ потоку стисненого повітря на холодну і гарячу фракції. Вперше цей ефект був відкритий у 1930-х роках французьким інженером Ж. Ранком при дослідженні процесів, що проходять у пристроях для очищення газу від пилу [1]. З метою вивчення теплових характеристик і підвищення ефективності температурного поділу німецький фізик Р. Хілш у 1945 р. проводив експерименти при різному вхідному тиску та різних геометричних параметрах установки, у подальшому названою трубою Ранка-Хілша [2]. В ході подальших чисельних експериментів з покращення продуктивності труби Ранка-Хілша проводились зміни В Установка більш широку конструкції. отримала назву «вихровий енергороздільник» (ВЕ).

Пристрій ВЕ, що зображено на рис. 1.1, складається з корпусу, тангенціального вхідного сопла, діафрагми, клапана та отворів під вихідні потоки газу [3].

Газ високого тиску надходить у ВЕ через одне чи кілька вхідних сопел, і його розширення створює вихор, що швидко обертається. Коли газ проходить периферійними шарами через камеру енергетичного поділу, то одна його частина формується у вигляді гарячого потоку повітря, а інша частина відводиться назад вздовж центральної осі за допомогою регулюючого клапана. Порівняно з вхідним потоком периферійні шари потоку мають високу температуру, а центральна частина має низьку температуру. Не дивлячись на зовнішньо простий енергетичний процес і безліч варіантів його опису, не існує жодного, який можна було б назвати єдино вірним.



Рис. 1.1. Схематичне зображення пристрою ВЕ:

1 – тангенціальне вхідне сопло; 2 – камера енергетичного поділу; 3 – вихідні потоки повітря;
4 – діафрагма; 5 – регулюючий клапан; 6 – циліндр, що приєднаний до діафрагми; 7 – циліндр, що приєднаний до камери з регулюючим клапаном; 8 – камера у формі усіченого конуса

Широке використання знайшли два види ВЕ (рис. 1.2): протиточний і прямоточний [4].



Рис. 1.2. Ілюстрація вихрового ефекту в протиточному (а) і прямоточному (б) ВЕ

У протиточного ВЕ отвори гарячого і холодного потоків повітря знаходяться на його протилежних кінцях, у той час як у прямоточного виду ці отвори розташовані на одному кінці (в протилежному від вхідного сопла), що реалізовано за рахунок використання спеціального регулюючого клапана.

З роками прийшли до висновку, що в протиточному ВЕ діапазон зміни температури холодного потоку повітря значно ширший за прямоточний вид ВЕ.

Крім кардинальної відмінності в конструкції ВЕ, на області застосування і ефективність суттєво впливає їх геометрія. Вона має значний вплив на поділ газових потоків за температурою і на загальну продуктивність пристрою. Наукові та інженерні дослідження направлені на визначення оптимальних геометричних параметрів для досягнення бажаних результатів:

- 1) розміри камери енергетичного поділу;
- 2) положення регулюючого конусного вентиля;
- 3) діаметр отвору діафрагми;
- 4) кількість вхідних отворів сопел;
- 5) форма вхідного сопла.

В дослідженні [5] був проведений аналіз впливу відношення довжини камери енергетичного поділу до її діаметру (L/D) на сумарний ККД ВЕ (рис. 1.3).

Сумарне ККД виражається як

$$\eta = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{\mu_{x} \left( T_{BX} - T_{x} \right)}{T_{BX} \ln \left( \frac{P_{BX}}{P_{x}} \right)} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{\left( 1 - \mu_{x} \right) \left( T_{\Gamma} - T_{BX} \right)}{T_{BX} \ln \left( \frac{P_{BX}}{P_{x}} \right)}, \tag{1.1}$$

де  $\gamma = \frac{c_P}{c_V}$  – відношення питомої теплоємність при постійному тиску до питомої

теплоємності при постійному об'ємі,  $\mu_x = \frac{\dot{m}_x}{\dot{m}_{BX}}$  – масова доля холодного потоку як відношення масової витрати вихідного холодного потоку повітря до масової витрати вхідного стисненого потоку повітря,  $T_{BX}$  – температура вхідного потоку

стисненого повітря,  $T_x$  – температура вихідного холодного повітря,  $T_r$  – температура вихідного гарячого повітря,  $P_{Bx}$  – тиск вхідного потоку стисненого повітря,  $P_x$  – тиск вихідного холодного потоку повітря.

Зміна масової витрати повітря досягається за рахунок положення конусного вентиля, який визначає об'єм вихідного гарячого потоку повітря.

Також було досліджено вплив відношення діаметра отвору діафрагми до діаметра камери енергетичного поділу (d/D) на сумарне ККД (рис. 1.4) [5].



Рис. 1.3. Графік залежності сумарного ККД ВЕ від відношення довжини камери енергетичного поділу до її діаметра при різних масових частках холодного потоку



Рис. 1.4. Графік залежності сумарного ККД ВЕ від масової частки холодного потоку повітря при різних значеннях відношення діаметра отвору діафрагми до діаметра камери енергетичного поділу

Так, результати цих досліджень допомагають визначити розміри камери енергетичного поділу протиточного ВЕ, які забезпечать його найвищий ККД.

У роботі [6] також досліджуються впливи масової частки холодного потоку повітря та відношення діаметра отвору діафрагми до діаметра камери енергетичного поділу на температури вихідних потоків повітря.

Рис. 1.5 відображає залежність радіальної температури холодного потоку повітря від величини (d/D) при трьох положеннях конусного вентиля (1, 2 и 3 мм). На відміну від [5] ці дані були отримані для того, щоб визначити розміри ВЕ, при яких досягається максимальний температурний поділ.

Під температурним поділом прийнято розуміти наступні різниці температур:

$$\begin{cases} \Delta T_{x} = T_{BX} - T_{x}; \\ \Delta T_{\Gamma} = T_{\Gamma} - T_{BX}. \end{cases}$$
(1.2)

Таким чином, чим більше різниця, тим ефективніший температурний поділ.





B)

Рис. 1.5. Графіки впливу різних значень масової частки холодного потоку повітря і відношення діаметра отвору діафрагми до діаметра камери енергетичного поділу на радіальну температуру холодного потоку повітря: a – d/D = 0,33; б – d/D = 0,416; в – d/D = 0,5

В роботі [7] досліджується вплив кількості вхідних отворів сопла на продуктивність ВЕ при різних положеннях конусного вентиля (рис. 1.6, а) та різному тиску вхідного потоку повітря (рис. 1.6, б).



Рис. 1.6. Графіки залежності температури холодного потоку повітря від масової частки холодного потоку (а) і тиску вхідного потоку повітря (б) при різній кількості вхідних отворів

Ці результати вказують на те, що менша кількість вхідних отворів за інших рівних умов сприяє отриманню більш холодного потоку повітря. Як і у вищезгаданих дослідженнях, ці залежності відображають суттєвий вплив на зміну температури холодного потоку повітря. Управління положенням конусного вентиля і тиском вхідного потоку повітря дає змогу контролювати вихідну температуру як для стабілізації температури, так і для позиціювання робочого режиму.

На ефективність температурного поділу впливає також такий параметр як матеріал вхідного сопла. У роботі [8] проводились експерименти з використанням сопел із скловолокна, алюмінію і сталі, та різною кількістю вхідних отворів. Результати цього дослідження також представляють собою сімейство статичних характеристик (рис. 1.7).



б)



в)

Рис. 1.7. Графіки залежностей температури холодного потоку повітря від тиску вхідного потоку повітря та кисню при різній кількості вхідних отворів сопла із скловолокна (а), алюмінію (б) і сталі (в)

Аналіз результатів проводився з метою визначити фіксовані параметри ВЕ та газу, що надходить до сопла, які забезпечують найбільшу ефективність ВЕ при заданих умовах експлуатації.

На прикладі цих типових робіт було зроблено висновок по те, що метою досліджень є розрахунок параметрів ВЕ, який забезпечує або його максимальну ефективність (ККД), або максимальний температурний поділ. З точки зору управління в обох випадках ВЕ буде ефективним (унікальний ВЕ – для Його індивідуального практичного застосування) лише сам собі. по використання не визначає ефективність роботи всій системи управління, оскільки розрахований подібним чином ВЕ є найбільш ефективним для конкретних умов його експлуатації. Тому доцільним є не пошук найкращого ВЕ, а розробка розумної системи управління, яка здатна виконувати задачі як для заданих «жорстких» умов, так і для відпрацювання нештатних ситуацій.

#### 1.2. Застосування вихрових енергороздільників в авіації

Основні критерії, яким мають задовольняти авіаційні системи і компоненти, включають достатню надійність при мінімальних масо-габаритних характеристиках та максимально можливій ефективності. ВЕ повністю відповідають вимогам бортовим компонентам: вони легкі, надійні, легко піддаються ремонту та мають високий ресурс. Перевага ВЕ полягає у можливості забезпечення місцевого охолодження, і це застосовано навіть в умовах, коли їх розміри можуть бути мінімальними.

При цьому живлення ВЕ, розташованого на борту літального апарата, можна отримати різними способами з урахуванням конкретних вимог літака та наявних ресурсів:

- 1) відбір повітря з авіаційного двигуна;
- 2) бортовий запас стисненого повітря;
- 3) використання швидкісного напору набігаючого потоку;
- 4) допоміжна силова установка;
- 5) бортовий повітряний компресор;
- 6) система екологічного контролю літака.

У ролі засобу охолодження, ВЕ може застосовуватись з метою підтримання температури окремих компонентів літальних апаратів [9-15].

Під час польотів літаків на надзвукових швидкостях, радіоелектронне обладнання функціонує в екстремальних умовах через підвищену температуру, що викликана динамічним нагрівом зовнішніх оболонок літального апарата.

Використання компресорного повітря дозволяє застосовувати ВЕ для охолодження компонентів на стоянці літака під час роботи двигунів чи при використанні аеродромної пневмомережі [16].

На основі ВЕ розроблені та використовуються вихрові вимірювачі статичної температури [17]. Конструкція вимірювача зображена на рис. 1.8.


Рис. 1.8. Вихровий авіаційний вимірювач статичної температури у розрізі

Властивість до самовакуумування та ефективної компенсації динамічного нагріву, притаманна ВЕ при високих швидкостях, дозволяє розглядати його у якості потенційного пристрою для охолодження бортового конденсаційного гігрометра. За рахунок невеликої інерційності, вихровий гігрометр зручно використовувати в ситуаціях метеорологічного зондування атмосфери з борта літака, що рухається зі швидкістю M = 1,5. При розміщені вихрового авіаційного гігрометра на дозвукових літаках, його можна живити стисненим повітрям, що виходить з компресора двигуна. Схематична конструкція вихрового гігрометра ВТ-2 зображена на рис. 1.9 [18].



Рис. 1.9. Схематична конструкція вихрового гігрометра ВГ-2

Позитивний досвід використання ВЕ представлений у роботі [19]:

 для установок комплексного термоакустичного впливу на виріб у ревербераційній випробувальній камері;

для автономного або шлангового кондиціонера, вентилюючого захисного костюма пілота;

 для наземного терморегулювання та термостатування ракетнокосмічної техніки тощо.

Представлені приклади застосування ВЕ свідчать про широке та ефективне їх використання в різних авіаційних конструкціях та пристроях.

1.3. Аналіз напрямів розробки систем управління процесом вихрового енергетичного поділу

конструкції Завдяки простій габаритам BE та малим широко використовується для вирішення різних технічних задач. Ці задачі потребують ефективність і надійність високу температурного поділу. Розрахунок ефективних ВЕ, індивідуальних під конкретні задачі, як це представлено в підрозділі 1.1, не є доцільним. Вони здатні функціонувати в різних режимах роботи в залежності від умов експлуатації. Враховуючи простоту конструкції ВЕ, інженери намагаються розробляти системи управління температурою не за рахунок модернізації ВЕ, а за допомогою різних принципів управління, додаткових модулів, реалізації гібридних схем тощо.

Багатообіцяючими є системи тригенеративного зберігання енергії, що працюю на стисненому повітрі. Зберігання повітря в резервуарах під високим тиком супроводжується високими втратами на дроселювання. Для зменшення втрат можливе використання ВЕ для перетворення частини надлишкового тиску у корисне нагрівання та охолодження потоків. Схема запропонованої у роботі [20] системи тригенеративного зберігання енергії представлена на рис. 1.10.



Рис. 1.10. Схематичне зображення системи попереднього розширення з використанням ВЕ

Зображена конфігурація представляє собою розімкнуту систему управління, в якій ВЕ приймає стиснене повітря (Air tank) з фіксованими параметрами, а вихідні потоки поступають на входи обмінників (HEX) для наступної обробки повітря.

Проста конструкція та можливість температурного поділу вхідного потоку дозволяють використовувати ВЕ для отримання холодного потоку повітря в системах кондиціювання [21]. Така система є екологічно чистою, оскільки у її робочому процесі не використовується агресивний холодоагент. В результаті експериментальних досліджень фізичної моделі системи кондиціювання із ВЕ у варіантах з прямим та непрямим теплообміном було встановлено, що температура при непрямому теплообміні вище, ніж при прямому теплообміні, проте спосіб прямого теплообміну має низький гідравлічний опір [21]. Принципова схема експериментальної установки представлена на рис. 1.11.



Рис. 1.11. Принципова схема експериментальної установки: 1 – компресор; 2 – осушувач повітря; 3 – регулятор тиску; 4 – повітряний фільтр; 5 – розширювальний бак; 6 – зворотні клапани; 7, 12 – вихровий енергороздільник; 8 – штатив; 9 – вхідне сопло; 10 – муфта; 11 – діафрагма; 13 – дросельний клапан; 14 – витратомір повітря; 15 – регістратор даних; 16 – комп'ютер

Стиснене повітря із компресора надходить до розширювального бака. Після того, як у ньому накопичується достатньо повітря, воно проходить через фільтр та подається на вхід ВЕ. Далі автори використовують цю систему для отримання максимально ефективного температурного поділу за рахунок різної кількості вхідних сопел, тиску вхідного повітря та масової частки холодного потоку повітря.

По суті, робота [21] полягає у тому, щоб застосувати завдання дослідження в таких працях, як [5–8], для практичного використання, інтегруючи ВЕ в конкретну систему. Основним результатом цієї роботи є визначення параметрів ВЕ і потоку стисненого повітря, при яких систему можна вважати найбільш ефективною для виконання поставлених задач. Недоліком такого рішення є те, що система формується під фіксовані умови експлуатації; до уваги не беруться можливі відхилення в параметрах вхідного потоку повітря, навколишнього середовища тощо.

ВЕ може надати значні можливості для покращення характеристик холодильних систем, які використовують цикл Джоуля-Томсона, і можуть забезпечити ефективну роботу при більш низьких перепадах тиску, з рекуперативними теплообмінниками меншого розміру і з дешевшими робочими рідинами, порівняно із використовуваними в даний час [22]. Принципова схема охолоджувача з ВЕ представлена на рис. 1.12.



Рис. 1.12. Принципова схема охолоджувача з ВЕ

Особливістю приведеної системи охолодження є використання додаткових функціональних елементів (рекуперативний теплообмінник, холодильне тепловідведення), використовуються обробки навантаження, ЩО для температури вихідних потоків повітря та подальшим підстроюванням параметрів стисненого повітря. Іншими словами, реалізується замкнутий контур управління температурою, що дає можливість системі стабілізувати малі відхилення вихідних параметрів та підлаштовуватись під невеликі зміни умов експлуатації.

У роботі [23] розглядається система повітряного циклу з використанням ВЕ задля покращення системи екологічного контролю всередині кабіни літака (рис. 1.13).



Рис. 1.13. Принципова система повітряного циклу з використанням ВЕ

Принцип роботи цієї установки не відрізняється від типового протиточного ВЕ. Тут холодний потік повітря подається в кабіну літака, попередньо пройшовши через водяний сепаратор. Гарячий потік повітря пропонується використовувати в системах протизледеніння або запотівання.

Недоліком такої системи є відсутність зворотного зв'язку, за допомогою якого можна було б відстежувати інформацію про температуру в кабіні та використовувати її для регулювання та стабілізації роботи ВЕ. Оператору потрібно власноруч регулювати клапан для того, щоб при необхідності змінювати температуру. Такий підхід впливає на швидкодію, точність та

надійність регулювання. Таким чином, можливе використання принципу управління за відхиленням. Проте проблема суттєвих некомпенсованих дестабілізацій залишається невирішеною.

У роботі [24] досліджується гібридна система охолодження бортових ІЧ-приймачів на основі вихрового та термоелектричного ефектів (рис. 1.14). Роль, яку виконує ВЕ, аналогічна представленій у роботі [21]. Відмінними рисами такої системи є наявність термоелектричного модуля, а також використання забортного повітря як додаткового джерела охолодження та стисненого повітря.



Рис. 1.14. Принципова схема гібридної системи охолодження бортового ІЧ-приймача

Незважаючи на те, що представлена система охолодження не містить зворотний зв'язок, додатковий рівень надійності та стабілізації вихідного холодного потоку повітря здійснюється за рахунок використання термоелектричного модуля. Проте залишається невирішеною проблема організації забору повітря, на що також вказують і автори; параметри вхідного стисненого повітря потребує безперервного моніторингу та оперативного регулювання.

Аналіз наведених досліджень вказує на їх загальні недоліки: розробка системи управління при номінальному режимі роботи, прив'язка до «жорстких» умов експлуатації та неможливість ефективно адаптуватися до позаштатних ситуацій.

#### 1.4. Особливості математичного опису вихрового енергороздільника

З метою отримання управляючих рівнянь ВЕ, необхідних для формування системи його управління, ряд досліджень вдається до чисельних досліджень взаємозв'язку параметрів вихрового потоку повітря. Вирішенню проблеми пошуку ефективної системи управління температурою може сприяти одержання математичних моделей ВЕ як залежностей параметрів вихідних потоків від управляючих параметрів, таких як масова частка холодного потоку повітря µ<sub>x</sub>, тиск P<sub>cT</sub> і температура T<sub>cT</sub> вхідного повітря. Таку точку зору можна вважати обґрунтованою завдяки аналізу характеристик ВЕ, наведеному у підрозділі 1.2. З огляду на недостатню вивченість взаємозв'язків параметрів потоків повітря, формування математичних моделей, що базується на законах термодинаміки та газодинаміки, не користується популярністю, проте все ж таки проводяться унікальні розрахунки з отримання моделей подібним чином.

Незважаючи на відсутність повного розуміння процесу енергетичного поділу, існує загальноприйнята залежність між вхідними та вихідними параметрами ВЕ. Вихідні параметри піддаються найбільшому впливу при зміні тиску і температури вхідного потоку повітря та положенню дроселя, що регулює вихід нецільового потоку повітря (гарячого потоку – в охолоджувальних ВЕ, холодного потоку – в нагрівальних ВЕ) [25]. Загальні холодопродуктивність та теплопродуктивність ВЕ представлені як:

$$Q_{\rm x} = G\mu c_{\rm p} \Delta T_{\rm x}; \qquad (1.3)$$

$$Q_{\Gamma} = G = (1 - \mu) \Delta T_{\Gamma}, \qquad (1.4)$$

де  $\Delta T_x$  – середньовагове значення зниження температури охолодженого потоку повітря,  $\Delta T_{\Gamma}$  – середньовагове значення зниження температури нагрітого потоку повітря.

Однак формалізація процесу вихрового енергетичного поділу є складним завданням, вирішення якого залежить від набагато більшої кількості факторів, ніж наведених у (1.3) та (1.4). Тому для розробки математичної моделі ВЕ вводяться параметри, що однозначно визначають номінальний режим роботи та зовнішні умови експлуатації, і одночасно з цим вводиться ряд припущень, націлених на спрощення структури моделей.

Дослідження [26] полягає у формуванні математичної моделі процесу нагрівання природного газу у ВЕ з урахуванням втрат динамічного тиску на кожній характерній ділянці ВЕ та ступеня нагрівання в ній. Вихідними даними для запропонованої математичної моделі є параметри, які під час роботи ВЕ на природному газі не можуть бути змінені, так як вони мають постійні значення в діапазоні зміни тиску та температури, характерні для транспортування природного газу. До цих параметрів автори відносять: густина природного газу, питома об'ємна теплоємність, геометричні розміри ВЕ, середні швидкості потоків повітря тощо.

Висновки авторів роботи [26] про необхідну сталість параметрів вказують на основний недолік – отримана математична модель може застосовуватися лише для статичної роботи ВЕ, і неможливість її використання для розрахунку його динамічних процесів. З цього припущення випливає, що подібні математичні моделі практично можуть застосовуватися для розрахунку необхідної температури вихідних потоків за заданих фіксованих умов експлуатації, і не можуть враховувати жодні динамічні процеси, крім тих, що існують у спрощеному вигляді.

У роботі [27] були проведені комплексні експерименти для характеристики роботи ВЕ за такими параметрами: безрозмірні температури холодного та гарячого виходу, безрозмірне розділення енергії холодних і гарячих газів і ККД. Досліджуваними вільними параметрами були: загальне співвідношення загального тиску до статичного між умовами входу та холодного виходу та масова частка холодного газу. Посилаючись на відсутність точних методів аналітичного опису та розрахунку реального процесу вихрового енергетичного поділу, автори формують підсумкові рівняння температури вихідних потоків газу. Тому процеси, що відбуваються всередині ВЕ, автори подають у вигляді діаграми температура-ентальпія (T-S) (рис. 1.15). Стверджується, що така методика розрахунку дозволяє врахувати вплив основних температурних та розрахункових параметрів у математичному описі.



Рис. 1.15. Т-S діаграма процесу вихрового енергетичного поділу

Внаслідок низки проміжних розрахунків формується рівняння, що описує температуру газу на виході з теплообмінника [27]:

$$\begin{cases} T_{0c}' = T_{0c} + k_1 \frac{\sum_{j=2}^{6} \frac{k_{fj} N u_{fj} A_{bj}}{D_b} (T_{wbj} - T_{amb}) + \dot{Q}_c}{\dot{m}_c c_p}; \\ T_{0h}' = T_{0h} + (1 - k_1) \frac{\sum_{j=2}^{6} \frac{k_{fj} N u_{fj} A_{bj}}{D_b} (T_{wbj} - T_{amb}) + \dot{Q}_c}{\dot{m}_h c_p}. \end{cases}$$
(1.5)

Особливістю даного рівняння є залежність температури вихідних потоків повітря від масової витрати холодного  $\dot{m}_c$  та гарячого  $\dot{m}_h$  повітря відповідно, які, своєю чергою, визначаються положенням конусного вентиля. Таким чином, представлена математична модель може бути використана для розрахунку динамічних процесів. Очевидним недоліком цієї моделі є її структура, обумовлена врахуванням безлічі параметрів, що впливають на точність і глибину опису моделі ВЕ.

Унікальний підхід до формулювання математичного опису роботи ВЕ представлено у статті [28]. Розрахунок характеристик нагріву та охолодження ВЕ проводився за допомогою штучних нейронних мереж з використанням експериментально отриманих даних. Вхідними даними мережі є тиск вхідного потоку, кількість сопел і масова частка холодного газу, на виході моделі виходить температурний градієнт. Структура штучної нейронної мережі представлена на рис. 1.16.

До недоліків використання такої штучної нейронної мережі можна віднести:

1) залежність від даних – мережа потребує великих об'єм даних для навчання. Якщо набір даних замалий чи нерепрезентативний, мережа може погано узагальнювати нові, невидимі дані, що призведе до перенавчання або зниженню продуктивності;

2) «чорний ящик» – відсутність прозорості є суттєвою проблемою для розуміння процесу прийняття рішень;

3) переоснащення – мережа схильна до перенавчання, коли модель вивчає шуми та перешкоди у навчальних даних, а не у базових шаблонах;

4) ресурсомісткість – розгортання штучної нейронної мережі В обмеженими ресурсами, вбудовані середовищах системи 3 таких ЯК (контролери), може виявитися складною задачею через вимоги ДО обчислювальних ресурсів та пам'яті.



Рис. 1.16. Структура штучної нейронної мережі для отримання математичного опису ВЕ

Таким чином, не можна стверджувати, що подібна модель зможе навчатися підстроювати систему під нештатні ситуації. Цілком ймовірно, що мережа сприятиме автоматичному регулюванню режиму роботи ВЕ, проте цей процес є вимогливим до рівня розуміння структури мережі розробником.

З іншого боку, проводяться дослідження щодо отримання рівнянь, що описують процес вихрового енергетичного поділу, які згодом застосовуються для побудови комп'ютерних моделей з використанням обчислювальної гідродинаміки (CFD моделей). Результати експериментів, проведених на такій розрахованій моделі, можна застосовувати для оберненої задачі – формування математичних моделей BE. Закручений потік усередині ВЕ моделюється з використанням стаціонарної форми рівнянь нерозривності (1.6), імпульсу (1.7) та енергії (1.8) [29-32]. Структура рівняння може відрізнятися залежно від кількості параметрів, що враховуються під час розрахунків. Один з варіантів цих рівнянь має наступний вигляд [32]:

$$\frac{\partial}{\partial x_{i}}(u_{i}) = 0; \qquad (1.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{j}} \left( \rho u_{i} u_{j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \mu_{t} \left( \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_{t} \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{i}} \right) \delta_{ij} \right]; \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{i}} \left( \rho u_{i} T \right) = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left( \frac{\mu}{\Pr} \frac{\partial T}{\partial x_{j}} \right).$$
(1.8)

При побудові CFD моделі ВЕ найчастіше застосовується стандартна k–є модель з метою вирішення рівнянь Нав'є-Стокса, усереднених за Рейнольдсом (RANS) [29-32]. Турбулентна кінетична енергія (1.9) та швидкість дисипації (1.10) можуть бути представлені в наступному вигляді [32]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon + S_k; \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_{j})}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{ij}} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{j}} \right] + \rho C_{1} S\varepsilon - \frac{\rho C_{2} \varepsilon^{2}}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + \frac{C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} G_{b} \varepsilon}{k} + S\varepsilon. \quad (1.10)$$

Завдяки розрахованій CFD моделі проводиться серія експериментів, спрямованих на отримання різноманітних статичних та динамічних

характеристик. Внаслідок аналізу цих характеристик формуються необхідні математичні моделі ВЕ.

Перевагою такого підходу вважають його популярність, зумовлену його варіативністю. Оскільки ряд існуючих програм (ANSYS, SolidWorks) вже містять безліч рівнянь, що описують газодинамічні процеси, то їх використовують безпосередньо з метою отримання CFD моделей. Варіативність їх застосування полягає в тому, що ці моделі використовують для порівняльного аналізу з експериментальними даними, детального аналізу досліджуваного процесу тощо.

Якщо прийняти спрощення та припущення, що вводяться для розрахунку СFD моделей, то експериментальні характеристики можна вважати обґрунтованими та достовірними. Тоді саме завдання формування математичних моделей на підставі експериментальних даних є загальнодоступним, що не потребує поглиблених знань, пов'язаних із самим процесом вихрового енергетичного поділу.

Об'єкти, які схильні до інтервальної невизначеності, вимагають особливого підходу до вирішення завдань ідентифікації та управління. Якщо прийняти, що невизначені параметри задаються не у вигляді точкових значень, а у вигляді інтервалів їх можливих значень, тоді параметри реального об'єкта будуть знаходитись у межах цього інтервалу. Таким чином, невизначеності, викликані недосконалістю CFD моделей, можуть бути враховані за допомогою інтервальних моделей.

З запропонованого методу проведено дослідження, у якого ВЕ сприймається як об'єкт із нескінченним числом змінних станів [33]. Запропонований оператор, який описує динаміку ВЕ, представлений у наступному вигляді:

$$\overline{W}_{Be}(s) = \frac{\overline{Q}_{x}(s)}{\overline{Z}(s)} = \frac{\overline{\kappa}_{Be}}{\prod_{k=1}^{n} (s + \overline{s}_{i})^{\overline{v}_{i}}},$$
(1.11)

- де  $\overline{W}_{Be}(s)$  інтервальна передавальна функція ВЕ за задавальним впливом;  $\overline{Q}_x(s)$  – інтервальне зображення потоку ентальпії холодного потоку повітря;  $\overline{Z}(s)$  – інтервальне зображення лінійного положення регулюючого вентиля;  $\overline{\kappa}_{Be}$  – інтервальне значення коефіцієнта передачі ВЕ;  $\overline{s}_i$  – інтервальні значення нулів та полюсів передавальної функції;
  - $\overline{\nu}_i$  інтервальні дробові значення показників ступеня.

З погляду математичного обґрунтування модель ВЕ (1.11) визначається з допомогою експериментальних частотних показників ВЕ. Запропонований принцип базується на аналізі графіків похідних логарифмічних амплітудночастотних та фазо-частотних характеристик ВЕ (рис. 1.17) [34].

Перевагою цього підходу є одночасне визначення структури математичної моделі ВЕ та значень її параметрів. Однак його недолік полягає в необхідності отримання експериментальних логарифмічних характеристик та їх складному, комплексному аналізі, що призводить до складностей під час роботи з отриманою математичною моделлю (1.16).



Рис. 1.17. Графіки похідних логарифмічних експериментальних амплітудно-частотних и фазо-частотних характеристик

Після отримання математичних моделей ВЕ наступним завданням є розробка системи управління вихідними параметрами. Більшість робіт, пов'язаних із розробкою різних систем управління на основі ВЕ, спрощують його математичну модель, оскільки метою реалізації таких систем є не дослідження вихрового ефекту з точки зору продуктивного управління, а практичне застосування цього ефекту [35, 36]. З цієї причини для поліпшення показників якості таких систем використовують класичний ПІД-регулятор [37, 38].

Так як параметри ВЕ піддаються флуктуації параметрів вхідного потоку, змін в умовах експлуатації та нештатних ситуацій, використання наведених вище класичних принципів управління може бути недостатньо не тільки для парирування цих впливів [39]. При синтезі системи управління ВЕ слід враховувати інтервальну невизначеність у його функціонуванні, спричинену дестабілізуючими впливами. Синтез такої системи має базуватися на інтервальній параметричній ідентифікації та самонастроюванні у реальному масштабі часу [40-42]. Тоді система буде здатна діагностувати і парирувати вплив, що виник внаслідок виходу параметрів ВЕ за межі обраних інтервалів.

Для синтезу системи з самонастроюванням під суттєві зміни параметрів найбільш продуктивним є адаптивний підхід, що базується на раціональному управлінні працездатністю об'єктів автоматичного управління (ОАУ) [43].

1.5. Аналіз класичних принципів управління та особливості принципу управління за діагнозом

Використання класичних принципів автоматичного управління (за задавальним впливом та за відхиленням) породжує функціональні схеми систем автоматичного управління (САУ) (рис. 1.18).

Під працездатною САУ розуміють такий стан, у якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність системи виконувати задані функції, відповідають вимогам технічного завдання. Для забезпечення працездатності ОАУ згідно технічного завдання необхідно виконувати відповідні умови, які на етапі експлуатації дозволяють також задовольняти цілий ряд вимог до живучості, безаварійності, стійкості до відмов.



Рис. 1.18. Узагальнені функціональні схеми розімкнутої (а) та замкнутої (б) САУ

Як було виявлено раніше, при розробці моделей ВЕ вводиться ряд різних припущень, що за визначенням параметри моделі не відповідатимуть параметрам реального ВЕ. Таким чином, у моделі спочатку повинен бути враховано інтервал, у межах якого, з деяким ступенем достовірності, існує справжнє значення або характеристика параметрів реального ВЕ. Крім цього, на працездатність ВЕ негативно впливають дестабілізуючі впливи, що вносять додаткові зміни до параметрів ВЕ. Для опису таких невизначеностей, невідповідності моделі реальному об'єкту, похибок у вимірах та небажаних змін параметрів, доцільно застосувати концепцію інтервальної невизначеності.

Дестабілізуючі впливи – це чинники, що дестабілізують номінальний режим роботи об'єкта чи системи. Зовнішні дії (перешкоди, шуми) призводять до неоднозначності вимірювань, внутрішні дії (відмови) призводять до суттєвої зміни параметрів математичних моделей.

Невизначеності, як і дестабілізації, викликані порушенням номінального режиму роботи реального об'єкта управління, на практиці зазвичай виникають унаслідок неточності виготовлення, зміни параметрів при старінні та зношуванні, неточності відомостей про динаміку процесу управління, стохастичної природи дестабілізуючих впливів.

Для управління об'єктом з інтервальною невизначеністю недостатньо інформації про відхилення вихідних сигналів від своїх еталонних значень. Потрібні конструктивні дані про місце впливу дестабілізації, його тип і вид та відповідні засоби їхнього парирування. Щоб підтримувати безпечну роботу та бажану продуктивність BE, і уникнути несправностей, система повинна порізному реагувати на невизначеність та дестабілізацію, незалежно від часу та місця виникнення дестабілізуючого впливу.

Широке використання принципу управління за відхиленням обумовлюється здатністю виявляти дестабілізуючі впливи у замкнутому контурі управління, компенсувати «малі» відхилення від заданого функціонування, що викликані дестабілізуючими впливами, коригувати динамічні властивості ОАУ за допомогою відповідних алгоритмів. За таких переваг використання принципу управління за відхиленням не дозволяє повною мірою забезпечувати умови працездатності САУ. У разі суттєвої зміни параметрів системи здійснюється відключення несправного елемента та його заміна на резервний варіант, що є витратним та невисокоефективним рішенням. Як альтернативний продуктивний підхід розглядається принцип управління за діагнозом, що застосовується в раціональних системах управління [43].

В Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» вперше формальні функціонально-логічні моделі, за допомогою яких описувались нештатні режими функціонування розімкнутих систем управління об'єктів, що знаходяться у статиці, було отримано у роботах [44, 45].

Згодом необхідність діагностування систем управління у динаміці призвела до опису аварійних режимів у вигляді лінійних диференціальних рівнянь. Результати безлічі теоретичних досліджень з розв'язання задач діагностування та відновлення працездатності космічного літального апарату були підкріплені результатами машинних експериментів на ЕОМ [46-49].

Подальші практичні та теоретичні дослідження почали проводитись у галузі відмовостійкості, де було визначено недосконалість попередньо розробленого підходу, яка полягає у протиріччі між необхідною та можливою глибиною діагностування, а також принциповою неможливістю ефективно використовувати надлишкові ресурси для якісного відновлення працездатності аерокосмічних об'єктів. Необхідність вирішення цих важливих питань призвела до розробки нової концепції діагностичних моделей та діагностичного забезпечення [50, 51].

Так були розроблені нові класи діагностичних моделей, що відображають зв'язок прямих діагностичних ознак з непрямими, доступними виміру: діагностичні функціональні моделі та діагностичні логічні моделі. Разом з цим було запроваджено критерії діагностування об'єктів управління, що дозволило проводити конструктивну оцінку якості цих діагностичних моделей [52, 53].

Ця нова концепція діагностичних моделей дозволила сформувати принципово інший підхід до розв'язання задачі глибокого діагностування систем управління аерокосмічними об'єктами за допомогою сигнально-параметричного діагностування. Виникнення в САУ будь-якого виду дестабілізації є невизначеною подією з точки зору як моменту її появи, так і місця та виду прояву. Запропонований підхід дав можливість послідовно усувати цю невизначеність: виявити дестабілізуючий вплив, визначити місце його виникнення у САУ, встановити клас та вид дестабілізації [54].

Дестабілізуючі впливи призводять до компенсованих і некомпенсованих несправностей. У той час, як компенсовані види можна парирувати за допомогою алгоритмічних засобів, реалізованих у вигляді програм, для некомпенсованих видів дестабілізацій потрібні реконфігурації алгоритмів управління і надмірна апаратура. Так, для парирування цих видів відмов уперше було синтезовано алгоритми відновлення працездатності САУ [55].

У процесі створення, по суті, нової галузі дослідження кожен етап розвитку підкріплювався прикладними результатами:

- САУ літаючої моделі СЛМТ-10ЛЛ літака Су-27 [56, 57];

– блок гіроскопічних датчиків, що включає датчик кута і два датчики кутової швидкості [58, 59];

- пневматичні сервоприводи [60-62];
- безплатформні інерціальні навігаційні системи [63];
- блок електродвигунів-маховиків [64];

Різноманітність прикладів систем управління, до яких може бути застосований принцип управління з діагнозу, вказує на його універсальність та адаптивність по відношенню до різної структури САУ та різноманітності математичного опису об'єктів управління [65-67].

Доцільним є синтез раціональної системи управління ВЕ, використовуючи принцип управління діагнозу, з метою надати більш ефективне управління в умовах невизначеності дестабілізуючих впливів порівняно із класичними принципами управління.

Раціональна система управління ВЕ складається з двох підсистем: пристрою раціонального управління (ПРУ) та об'єкта раціонального управління (ОРУ), пов'язаних між собою сигнальними зв'язками (рис. 1.19).



Рис. 1.19. Узагальнена функціональна схема раціональної системи управління

Раціональне управління формується у результаті об'єднання аналітичних засобів, обчислювальних, макетних та стендових експериментальних досліджень.

У цьому дослідженні розглядається принцип управління за діагнозом, який здатний виключити недоліки принципів управління за задавальним та збурюючим впливами:

– безперервне регулювання та адаптація управляючого впливу до змін параметрів системи за рахунок замкнутого контуру управління;

– парирування причин дестабілізуючих впливів, а не лише компенсування їх наслідків;

 локалізація негативного впливу на систему та реагування на неї без прив'язки до часу перехідного процесу САУ;

 підстроювання параметрів функціонування системи з метою стабілізації величини в рамках надійної експлуатації;

– використання певних ефективних способів відновлення працездатності під конкретний вид дестабілізуючого впливу за рахунок глибокого діагностування.

Таким чином, аналіз класичних принципів управління з точки зору можливості їх застосування в умовах дестабілізуючих впливів, показав обмежену їх здатність як діагностувати причини дестабілізації, так і парирувати ці впливи. Принцип управління за діагнозом, як свідчить досвід його використання, дозволяє формувати раціональне управління в умовах невизначеності дестабілізуючих впливів.

1.6. Постановка задач дисертаційного дослідження

Мета дослідження полягає у реалізації моделі раціональної системи управління ВЕ за допомогою його діагностичних моделей та алгоритмів відновлення працездатності функціональних елементів ОРУ. Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних задач:

 провести аналіз напрямів вивчення процесів вихрового енергетичного поділу та сформувати задачі дисертаційного дослідження;

2) удосконалити метод структурно-параметричної ідентифікації математичної моделі ВЕ за його експериментальними частотними характеристиками за рахунок використання похідних полінома;

3) побудувати комп'ютерну модель ВЕ за допомогою CFD моделі з метою дослідити процес вихрового поділу та експериментально отримати статичні характеристики BE;

4) розробити лінійні діагностичні моделі ВЕ як ОРУ, використовуючи структурні та параметричні особливості нештатного функціонування ВЕ;

5) розробити метод формування алгоритмів діагностування ВЕ як ОРУ, використовуючи фрагментарні лінійні діагностичні моделі з метою спрощення структури алгоритмічного забезпечення процесу раціонального управління;

 розробити метод формування алгоритмів відновлення працездатності функціональних елементів ОРУ за допомогою відповідних засобів парирування дестабілізуючих впливів;

7) реалізувати комп'ютерну модель раціональної системи управління ВЕ та провести серію експериментів, що підтверджують її ефективність.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз особливостей використання ВЕ. Визначено, що ВЕ використовуються системами охолодження блоків бортового електронного обладнання на літаку, в системах протизледеніння, системами кондиціювання салонів літаків і костюмів пілотів, системами очищення повітря тощо.

2. В результаті проведеного аналізу методів структурної та параметричної ідентифікації встановлено, що недоліком запропонованого методу є складна, комплексна структура математичної моделі ВЕ як ОАУ, яка не дає можливості у повному обсязі використовувати наявні інструменти аналізу безперервних та дискретних систем управління.

3. З проведеного аналізу функціональних можливостей принципів управління, зроблено висновок про актуальність використання раціонального управління ВЕ в умовах невизначеності дестабілізуючих впливів.

4. Визначено та структуровано задачі дисертаційного дослідження, виходячи з необхідності побудови раціональної системи управління ВЕ як об'єктом з невизначеністю шляхом вирішення завдань діагностування дестабілізуючих впливів на функціональні елементи та відновлення їх працездатності.

### РОЗДІЛ 2

### МОДЕЛІ ВИХРОВОГО ЕНЕРГОРОЗДІЛЬНИКА ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

2.1. Графічна, фізична моделі та принцип дії вихрового енергороздільника як об'єкта автоматичного управління

2.1.1. Опис експериментальної установки на базі вихрового енергороздільника і його експериментальних характеристик

На кафедрі систем управління літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. Н. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» було розроблено експериментальну установку для дослідження процесів вихрового енергетичного поділу [68]. Зовнішній вигляд макетного зразка зображено на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Зовнішній вигляд експериментального макета на базі малогабаритного ВЕ

Функціональна схема установки відображає склад функціональних елементів та зв'язки між ними, що дозволяють отримати ефект вихрового енергетичного поділу (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Функціональна схема ВЕ

В роботі [25] описані умови і результати експериментальних досліджень. Експеримент проводився для ВЕ, що представляє собою протиточний ВЕ з одним сопловим тангенціально закрученим входом площиною  $F_{\pi} = 1 \text{ мм}^2$ , камерою енергетичного поділу діаметром D = 5,8 мм та довжиною L = 116 мм, регулюючим вентилем, розміщеним з боку виходу гарячого потоку повітря, з діапазоном переміщення  $\Delta \zeta = 2 \text{ мм}$ , діафрагми діаметром d = 2,5 мм. Тиск вхідного повітря складає  $P_{cr} = 5...7$  атм, температура навколишнього середовища  $T_{Hc} = 18,85 \text{ °C}.$ 

Регулювання температурою проводилось завдяки різним положенням регулюючого вентиля: від перекриття «гарячого виходу» ВЕ до крайнього положення. Лінійне переміщення вентиля здійснювалося за допомогою крокового двигуна (КД) через редуктор. Було проведено серію експериментів та отримано відповідні масиви числових даних.

У ході експериментальних досліджень було отримано такі характеристики:

– статичні характеристики як залежності температури холодного та гарячого потоків повітря від положення регулюючого вентиля (рис. 2.3) [68];

 перехідні характеристики як залежності потоку енергії холодного потоку повітря від часу (рис. 2.4) [25];

логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (ЛАЧХ) (рис. 2.5) [25].
 Потік енергії представлений у наступному вигляді:

$$Q_x = G_x C_p T_x^*, \qquad (2.1)$$

де  $G_X$  – масова секундна витрата холодного потоку повітря,  $C_P$  – питома ізобарна теплоємність повітря,  $T_X^*$  – температура гальмування холодного повітря.



Рис. 2.3. Залежність температури холодного (а) та гарячого (б) потоків повітря від положення регулюючого вентиля: ■ – P = 5 атм; ● – P = 6 атм; ▲ – P = 7 атм



Рис. 2.4. Залежність потоку енергії холодного повітря від часу при P = 6 атм (а) і P = 7 атм (б)



Рис. 2.5. ЛАЧХ ВЕ для каналу холодного потоку повітря: • – P = 6 атм; • – P = 7 атм

Ці характеристики будуть використані для валідації CFD моделі BE. Також характеристики CFD моделі будуть застосовані для вирішення задач структурнопараметричної ідентифікації математичної моделі BE.

## 2.1.2. Розробка обчислювальної моделі гідродинаміки вихрового енергороздільника

На підставі цих даних було розроблено CFD модель (рис. 2.6) у середовищі моделювання SolidWorks. Чисельне моделювання течії повітря всередині BE було проведено з використанням вбудованого інструменту для моделювання потокових процесів у Flow Simulation [69]. Ця модель застосовувалась для отримання траєкторії руху потоку та його поверхневих параметрів для подальшого аналізу процесу вихрового поділу.

Аналіз одержаних процесів підтверджує сформульовану А. Ф. Гуцулом гіпотезу. Вона полягає в наступному: у центрі вихору виявляється та частина вхідного повітряного потоку, яка спочатку мала незначний запас кінетичної енергії, а механізмом, що забезпечує потрапляння до центру вихору саме цієї частини потоку, є поділ у поле відцентрових сил елементів потоку, які мають різну тангенціальну швидкість [70].



Рис. 2.6. CFD модель процесу вихрового поділу

Згідно з цією гіпотезою, принцип вихрового поділу полягає в наступному: в момент надходження стиснутого повітря через штуцер 1 у ВЕ цей рівномірний потік більшою мірою володіє потенційною енергією, вираженою тиском повітря, і меншою мірою – кінетичною енергією, що характеризується швидкістю руху повітряного потоку. Коли потік потрапляє в тангенціально закручений вхід 2, його швидкість різко зростає через звуження вхідного каналу, а температура і тиск знижуються.

Після того, як закручений потік потрапляє в периферійні шари камери енергетичного поділу 3, швидкість руху потоку знижується за рахунок того, що між частинками повітря і внутрішньою стінкою камери енергетичного поділу значною мірою зростає сила тертя, отже підвищується і температура потоку.

Перед переходом між камерою енергетичного поділу та внутрішнім об'ємом корпусу вентиля 4 швидкість потоку повітря підвищується через те, що вентиль перекриває значну частину робочої області ВЕ. У цей момент температура по всьому периметру перерізу знижується, а тиск залишається незмінним.

На рис. 2.7 показано, що при попаданні повітря у внутрішній об'єм корпусу вентиля 4 вентиля тиск потоку знижується до атмосферного тиску, а температура знову зростає.



Рис. 2.7. Відображення зміни потоку повітря під час його проходження через внутрішній об'єм корпусу вентиля

Тут потік набуває хаотичного характеру руху. У зв'язку з цим, частина потоку, що виходить через дросель: нерівномірна за температурою і швидкістю, але рівномірна за тиском.

Залишковий потік повітря через центральні шари камери енергетичного поділу 5 направляється до діафрагми 6. Потік має тиск, що трохи вище за тиск зустрічного потоку на цьому перерізі, малу температуру та швидкість. Останнє

зумовлено тим, що об'єм потоку, що рухається у зворотному напрямку, менший за той об'єм, що заповнював собою первинний потік.

При цьому спостерігається наступне: на поверхнях суміжних повітряних потоків, завдяки наявності зчеплення частинок повітря між собою, виникає сила тертя, що призводить до зниження швидкості тієї частини потоку, що рухається центральними шарами камери енергетичного поділу 5, по відношенню до повітряного потоку, що рухається за периферійними шарами 3.

На виході діафрагми 6 температура залишкового потоку в кілька разів нижче, ніж температура тієї частини потоку, що була розділена після проходження тангенціально закрученого входу 2, однак не була спрямована до «холодного виходу» ВЕ. Через те, що периферійні шари потоку повітря, які виходять з діафрагми, закручені; центр, відносно якого рухається холодний залишковий потік, злегка зміщений щодо осі камери енергетичного поділу 5. Розподіл температури вихідного холодного потоку повітря на виході з діафрагми представлено на рис. 2.8.



Рис. 2.8. Розподіл температури вихідного холодного потоку повітря на виході з діафрагми

Адекватна комп'ютерна модель ВЕ дозволяє вимірювати та оцінювати параметри у будь-якій точці камери енергетичного поділу (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Розподіл температури повітря вздовж камери енергетичного поділу

Уявлення про точкові параметри температурного поділу всередині ВЕ принципово не можна сформувати, спираючись на експериментальні дані, оскільки внутрішні параметри не можуть бути виміряні без спотворення вихрового ефекту.

2.2. Математичний опис номінального режиму функціонування вихрового енергороздільника як об'єкта автоматичного управління

# 2.2.1. Формування функціональної та структурної схем об'єкта автоматичного управління

Як було зазначено в підрозділі 2.1, керуючим впливом на ВЕ є положення регулюючого вентиля, лінійне переміщення якого відбувається за рахунок

роботи КД через редуктор. Таке поєднання виконавчих пристроїв може бути представлене у вигляді єдиного функціонального елемента привода. Тоді керуючим впливом на ВЕ як ОАУ буде напруга, що подається для управління приводом. Функціональна схема привода представлена на рис. 2.10.

Привод як виконавчий пристрій реалізований на основі КД із чотирифазним керуванням. Вал КД через редуктор лінійно переміщує регулюючий конусний вентиль. Використання КД дозволяє спростити алгоритми управління вентилем за рахунок відмови від датчика положення вентиля зі зворотним зв'язком.



Рис. 2.10. Функціональна схема привода

На рис. 2.10 позначено:

- u<sub>y</sub>(kT<sub>0</sub>) управляюча напруга, В;
- φ(t) кутове положення вала КД, рад;
- $\zeta(t) лінійне положення регулюючого вентиля, мм;$
- D<sub>1</sub> множина дестабілізуючих впливів, діючих на привод.

До складу блоку датчиків входять два вимірювачі температури на основі платинових терморезисторів, для гарячого та холодного потоків повітря відповідно. Кожен із датчиків підключений до блоку узгодження, де формуються сигнали постійного струму, які змінюються пропорційно до зміни фізичного параметра.

Функціональна схема ОАУ приведена на рис. 2.11.



Рис. 2.11. Функціональна схема ОАУ

На рис. 2.11 позначено:

-  $T_x(t)$  і  $T_r(t)$  – температура холодного і гарячого потоків повітря, °C;

u<sub>x</sub>(t) і u<sub>r</sub>(t) – вихідні напруги датчиків температури холодного і гарячого потоків повітря, В;

Р<sub>ст</sub>(t) – тиск вхідного потоку повітря, атм;

Т<sub>ст</sub>(t) – температура вхідного потоку повітря, °C;

- D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> i D<sub>4</sub> – дестабілізуючі впливи, що діють на ОАУ,  $D = \bigcup_{i=1}^{4} D_i$ .

Подібна розімкнена схема є найпростішим варіантом реалізації системи управління. Вона може бути основою формування більш складних функціональних схем, що включають в себе додаткові елементи, управляючі сигнали та зворотні зв'язки. Приклади таких функціональних схем були розглянуті у розділі 1. І, як показав аналіз, існують два основні способи зміни температури вихідних потоків повітря: шляхом переміщення регулюючого вентиля (рис. 2.12, а) та за рахунок зміни тиску та/або температури вхідного потоку повітря (рис. 2.12, б). Також можливий комбінований варіант, що забезпечить варіативність управління та широкий діапазон функціонування ВЕ (рис. 2.12, в).

На рис. 2.12, а відображено зворотний зв'язок, завдяки якому контролер отримує інформацію від датчиків температури  $u_x$  і  $u_r$ . З цих даних він регулює управляючий сигнал  $u_y$ , щоб температура вихідних потоків  $T_x$  і  $T_r$  відповідала необхідним значенням, збереженим у контролері. Тиск  $P_{cr}$  і температура  $T_{cr}$  вхідного потоку повітря розглядаються не як управляючі сигнали, а як енергія, що підводиться до ВЕ і необхідна для розділення вхідного потоку, тобто  $P_{cr}(t) = \text{const}, T_{cr}(t) = \text{const}.$ 

На рис. 2.12, б контролер формує регулюючий сигнал  $u_p$  для управління роботою компресора, за рахунок чого виникають зміни в параметрах стисненого повітря  $P_{cr}$  і  $T_{cr}$ . Тому температура вихідних потоків  $T_x$  і  $T_r$  буде змінюватися, поки не завершиться перехідний процес. У разі вентиль не змінює своє положення  $\zeta$ , тобто  $u_y(kT_0) = 0$ ,  $\zeta(t) = \text{const.}$  На рис. 2.12, б показано відсутність зв'язку між контролером і приводом, так мається на увазі, що контролер не використовує цей канал управління для регулювання вихідних параметрів ВЕ.

На рис. 2.12, регулювання температур  $T_x$  і  $T_r$  відбувається двома каналами  $u_y$  і  $u_p$ , описаних вище. Активний канал обирається контролером виходячи з алгоритмів управління, закладених у ньому.



a)



б)



в)

Рис. 2.12. Узагальнені функціональні схеми замкнутої системи управління за положенням регулюючого вентиля (а), параметрами вхідного потоку повітря (б) та комбінованого виконання (в)

Для формування узагальнених функціональних схем (2.12) було запроваджено низку припущень:

1. Під контролером будемо розуміти апаратно-програмний комплекс, що включає в себе задавальний пристрій, АЦП, алгоритми управління тощо.

2. Під компресором розуміється будь-яке джерело стисненого повітря, здатне змінювати параметри стисненого повітря за рахунок сигналу керування.

3. Дестабілізуючі впливи D множини 3 виникають лише В функціональних елементах ОРУ (рис. 2.11). На функціональний схемах, представлених на рис. 2.12, а та рис. 2.12, в, всі елементи, що можуть піддаватися впливу дестабілізації, знаходяться всередині замкнутого контуру управління. На функціональній схемі, представленій на рис. 2.12, б, компенсація параметрів у разі несправного привода здійснюватиметься контролером за непрямими параметрами, оскільки передбачається, що канал управління переміщенням вентиля не піддається регулюванню.

4. Як додаток до попереднього пункту, передбачається, що канал управління параметрами вхідного потоку повітря має великий рівень надійності, стійкості до відмов і живучості в порівнянні з функціональним елементами ОРУ.

Таким чином, замкнутий контур, багатоканальне управління та правильно розроблені алгоритми управління дозволяють використовувати інформацію про стан ВЕ як ОРУ для оперативного визначення небажаних змін параметрів ВЕ, діагностування працездатності, вибору та реалізації відповідного способу парирування цих змін (без застосування кардинальних засобів як використання резервних функціональних елементів).

Грунтуючись на функціональній схемі (рис. 2.11), була розроблена структурна схема ОАУ (рис. 2.13).



Рис. 2.13. Структурна схема ОАУ
Структурна схема відображає інформаційно-перетворювальні особливості ОАУ у лінійному наближенні за допомогою передавальних функцій, що описують перетворювальні властивості функціональних елементів у номінальному режимі.

На рис. 2.13 позначено:

$$_{\rm -} W_{\rm np}(s) = \frac{Z(s)}{U_y(s)}$$
 – передавальна функція привода;

$$_{-}$$
 W<sub>ox</sub> (s) =  $\frac{T_x(s)}{Z(s)}$  і W<sub>or</sub> (s) =  $\frac{T_r(s)}{Z(s)}$  – передавальні функції ВЕ для

каналів холодного та гарячого потоків повітря відповідно;

$$- W_{\mathrm{dx}}(s) = \frac{U_{\mathrm{x}}(s)}{T_{\mathrm{x}}(s)} i W_{\mathrm{dr}}(s) = \frac{U_{\mathrm{r}}(s)}{T_{\mathrm{r}}(s)} - \mathrm{передавальні} \phi \mathrm{ункції} \mathrm{датчиків}$$

температури холодного та гарячого потоків повітря відповідно;

- U<sub>y</sub>(s) - управляюча напруга, перетворена за Лапласом, В;

- Z(s) – положення вентиля, перетворене за Лапласом, мм;

– T<sub>x</sub>(s) і T<sub>г</sub>(s) – температура холодного і гарячого потоків повітря відповідно, перетворені за Лапласом, °C;

– U<sub>x</sub>(s) і U<sub>r</sub>(s) – вихідні напруги датчиків температури холодного і гарячого потоків відповідно, перетворені за Лапласом, В.

КД, який використовується в системі як виконавчий елемент, є розімкненим і не містить редуктора. Це пояснюється тим, що момент опору на валу КД, що визначається силою нормального тиску повітря на конусний вентиль, на порядок менше номінального крутного моменту КД завдяки вибору профілю конуса з малим кутом конусності. У свою чергу регулюючий вентиль виконує функцію редуктора, що перетворює кутове переміщення у пропорційне йому лінійне. Тоді передавальну функцію привода можна записати як:

$$W_{\Pi p}(s) = \frac{Z(s)}{U_{y}(s)} = \frac{\kappa_{\Pi p}}{s}, \qquad (2.2)$$

де к<sub>пр</sub> – коефіцієнт передачі привода, мм/В.

Передавальні функції датчиків температури можна представити як:

$$\begin{cases} W_{\text{f}x}\left(s\right) = \frac{U_{x}\left(s\right)}{T_{x}\left(s\right)} = \frac{\kappa_{\text{f}x}}{T_{\text{f}x}s+1};\\ W_{\text{f}r}\left(s\right) = \frac{U_{r}\left(s\right)}{T_{r}\left(s\right)} = \frac{\kappa_{\text{f}r}}{T_{\text{f}r}s+1}, \end{cases}$$
(2.3)

де к<sub>дх</sub> і к<sub>дг</sub> – коефіцієнти передачі датчиків температури холодного і гарячого потоків повітря, В/°С;

 $T_{\rm dx}$  і  $T_{\rm dr}$  – сталі часу датчиків температури холодного і гарячого потоків повітря, с.

Зважаючи на недостатню вивченість механізму температурного поділу, для отримання математичної моделі ВЕ доцільно скористатися експериментальними характеристиками. Так, для розрахунку коефіцієнта передачі ВЕ будуть використані дані комп'ютерного моделювання в середовищі SolidWorks, для визначення структури та динамічних параметрів математичної моделі ВЕ доцільно скористатися експериментальними ЛАЧХ.

# 2.2.2. Лінеаризація статичних характеристик вихрового енергороздільника

Дані CFD моделі представлені у вигляді залежностей температури холодного (рис. 2.14) та гарячого (рис. 2.15) потоків повітря від положення регулюючого вентиля при значеннях вхідного потоку повітря 5, 6 та 7 атм [69].

На рис. 2.14. спостерігаються залежності, які мають нелінійний неоднозначний характер із яскраво вираженими екстремумами. Ця залежність відповідає дослідженням [71]. Характеристики представлені на рис. 2.15 також є нелінійними.

Подані залежності пояснюються наступним: при переміщенні регулюючого вентиля область, через яку повітряний потік потрапляє у внутрішній об'єм корпусу вентиля, збільшується, що призводить до зниженню температури гарячого потоку повітря (рис. 2.15). Збільшення тиску призводить до підвищення температури, і положення регулюючого вентиля значно не позначається на цьому збільшенні, що підтверджується рис. 2.15.



Рис. 2.14. Залежність температури холодного потоку повітря від положення регулюючого вентиля



Рис. 2.15. Залежність температури гарячого потоку повітря від положення регулюючого вентиля

Існує також таке положення регулюючого вентиля ( $\zeta \approx 0,5 \dots 0,6$  мм), при якому об'єм гарячого потоку повітря буде досить великим, щоб кінетична енергія холодного потоку повітря значно зменшилася – і температура холодного потоку повітря знову почала зростати (рис. 2.14). На рис. 2.14 спостерігається зниження температури при збільшенні тиску вхідного потоку повітря, при цьому положення регулюючого вентиля не змінюється.

Для обчислення коефіцієнта передачі були проведені розрахунки ВЕ з різними параметрами вихрового потоку, починаючи з умови повного закриття камери вентиля і закінчуючи умовою його повного відкриття. Отримані нелінійні характеристики дозволяють перейти до побудови найпростіших математичних моделей статичного перетворення за допомогою розбиття їх на два яскраво виражені інтервали та проведення лінеаризації представлених залежностей. У результаті інтервальної лінеаризації нелінійних статичних характеристик визначаються атрибути математичних моделей ВЕ для 12 режимів роботи в залежності від вихідного потоку повітря, величини тиску вхідного потоку повітря та положення регулюючого вентиля.

Атрибути математичних моделей ВЕ для каналу холодного потоку повітря (рис. 2.14) при 5 атм:

- 1) похибка лінеаризації: 0,44 і 0,9 °С;
- 2) робочі точки: {0,25; 1,4} і {0,75; 5,33};
- 3) діапазони вхідного сигналу Δζ: [0; 0,5] і [0,5; 2] мм;
- 4) діапазони вихідного сигналу ΔТ<sub>x</sub>: [3,32; -0,52] і [-0,52; 11,18] °С;
- 5) коефіцієнт передачі к<sub>ох</sub>: -7,68 і 7,8 °С/мм,

де Δζ – приріст переміщення регулюючого вентиля відносно його вихідного положення;

 $\Delta T_x$  – приріст температури холодного потоку повітря;

 $\kappa_{ox} = \Delta T_x / \Delta \zeta$  – коефіцієнт передачі ВЕ для каналу холодного потоку повітря.

Атрибути математичних моделей ВЕ для каналу холодного потоку повітря (рис. 2.14) при 6 атм:

- 1) похибка лінеаризації: 0,55 і 1,34 °С;
- 2) робочі точки: {0,3125; -5,175} і {1,3125; 1,415};
- 3) діапазони вхідного сигналу ∆ζ: [0; 0,625] і [0,625; 2] мм;
- 4) діапазони вихідного сигналу ∆Т<sub>x</sub>: [-2; -8,35] і [-8,35; 11,18] °С;
- 5) коефіцієнт передачі к<sub>ох</sub>: -10,16 і 11,9 °С/мм.

Атрибути математичних моделей ВЕ для каналу холодного потоку повітря (рис. 2.14) при 7 атм:

- 1) похибка лінеаризації: 1,55 і 2,56 °С;
- 2) робочі точки: {0,3125; -11,925} і {1,3125; -7,575};
- 3) діапазони вхідного сигналу Δζ: [0; 0,625] і [0,625; 2] мм;
- 4) діапазони вихідного сигналу ∆Т<sub>x</sub>: [-7,5; -16,35] і [-16,35; 1,2] °С;
- 5) коефіцієнт передачі к<sub>ох</sub>: -14,16 і 12,76 °С/мм.

Рівняння кожної наведеної лінеаризованої характеристики:  $\Delta T_x = \kappa_{ox} \cdot \Delta \zeta$ .

Максимальна похибка лінеаризації нелінійних статичних характеристик ВЕ для каналу холодного потоку повітря складає 15 %, а інтегральна похибка складає 26 % при 7 атм.

Атрибути математичних моделей ВЕ для каналу гарячого потоку повітря (рис. 2.15) при 5 атм:

- 1) похибка лінеаризації: 1,31 і 0,86 °С;
- 2) робочі точки: {0,4375; 33,85} і {1,4375; 22,1};
- 3) діапазони вхідного сигналу ∆ζ: [0; 0,875] і [0,875; 2] мм;
- 4) діапазони вихідного сигналу ΔТ<sub>г</sub>: [42,5; 25,2] і [25,2; 19] °С;
- 5) коефіцієнт передачі ког: -19,77 і -5,51 °С/мм,

де  $\Delta T_{\rm F}$  – приріст температури гарячого потоку повітря;

 $\kappa_{or} = \Delta T_r / \Delta \zeta$  – коефіцієнт передачі ВЕ для каналу гарячого потоку повітря.

Атрибути математичних моделей ВЕ для каналу гарячого потоку повітря

(рис. 2.15) при 6 атм:

- 1) похибка лінеаризації: 1,7 і 0,88 °С;
- 2) робочі точки: {0,4375; 41,5} і {1,4375; 26};
- 3) діапазони вхідного сигналу Δζ: [0; 0,875] і [0,875; 2] мм;
- 4) діапазони вихідного сигналу ΔТ<sub>г</sub>: [53; 30] і [30; 22] °С;
- 5) коефіцієнт передачі ког: -26,28 і -7,11 °С/мм.

Атрибути математичних моделей ВЕ для каналу гарячого потоку повітря

(рис. 2.15) при 7 атм:

- 1) похибка лінеаризації: 1,7 і 1,56 °С;
- 2) робочі точки: {0,4375; 45,6} і {1,4375; 28,15};
- 3) діапазони вхідного сигналу ∆ζ: [0; 0,875] і [0,875; 2] мм;
- 4) діапазони вихідного сигналу ΔТ<sub>г</sub>: [58,7; 32,5] і [32,5; 23,8] °С;
- 5) коефіцієнт передачі ког: -29,94 і -7,73 °С/мм.

Рівняння кожної наведеної лінеаризованої характеристики:  $\Delta T_r = \kappa_{or} \cdot \Delta \zeta$ .

Максимальна похибка лінеаризації нелінійних статичних характеристик ВЕ для каналу гарячого потоку повітря складає 9 %, а інтегральна похибка складає 14 % при 6 атм.

За графіками на рис. 2.14, 2.15 можна зазначити, що використання в якості другого сигналу управління тиску Р<sub>ст</sub> стиснутого повітря на вході ВЕ дозволяє розширити діапазон робочих режимів ОАУ. Крім того, змінення Р<sub>ст</sub> може бути використано як додатковий ресурс для парирування окремих дестабілізуючих впливів і, відповідно, виконавчий орган у магістралі стиснутого повітря та вимірювачі тиску мають бути введені до структури ОАУ. Приналежність такого виконавчого органу до структури ВЕ або до структури джерела стиснутого повітря залежить від технічної реалізації самого джерела. Тому, з урахуванням уведених припущень, для подальшого визначення структури і параметрів математичної моделі вихрового енергороздільника прийнято Р<sub>ст</sub> = const.

# 2.2.3. Ідентифікація структури і параметрів моделі вихрового енергороздільника

ВЕ представляє собою об'єкт з розподіленими параметрами, для якого отримання математичної моделі аналітичним способом неможливе через особливості ВЕ і недостатню вивченість вихрового поділу. Тому для отримання математичної моделі ВЕ доцільно використовувати експериментальні частотні характеристики. Вимоги, які пред'являються ВЕ [72]:

1) ВЕ повинен реагувати на вхідний гармонійний сигнал;

2) вхідний гармонійний сигнал та відповідна реакція ВЕ на нього повинні піддаватися вимірюванням.

У роботі було розглянуто два варіанти вирішення цього завдання: інтерполяція методом невизначених коефіцієнтів [73] та використання похідних ЛАЧХ [74]. Щоб скористатися методом невизначених коефіцієнтів, потрібно знати бажану структуру передавальної функції ВЕ. У якості прикладу розглянуто передавальну функцію ВЕ для каналу холодного потоку повітря при P<sub>ct</sub> = 6 атм з наступною структурою:

$$W_{ox}(s) = \frac{T_x(s)}{Z(s)} = \frac{\kappa_{ox}}{(T_{ox1}s+1)(T_{ox2}s+1)},$$
(2.4)

де к<sub>ох</sub> – коефіцієнт передачі ВЕ для каналу холодного потоку повітря;

Тох1 і Тох2 – сталі часу ВЕ для каналу холодного потоку повітря.

Інтерполяція проводиться за рахунок системи рівнянь амплітудночастотної характеристики (АЧХ) передавальної функції обраної структури:

$$\begin{cases} A_{1}^{2} \cdot \omega_{1}^{4} \cdot \hat{T}_{ox1}^{2} \cdot \hat{T}_{ox2}^{2} + A_{1}^{2} \cdot \omega_{1}^{2} \cdot \left(T_{ox1}^{2} + T_{ox2}^{2}\right) - \hat{\kappa}_{ox}^{2} = -A_{1}^{2}; \\ A_{2}^{2} \cdot \omega_{2}^{4} \cdot \hat{T}_{ox1}^{2} \cdot \hat{T}_{ox2}^{2} + A_{2}^{2} \cdot \omega_{2}^{2} \cdot \left(T_{ox1}^{2} + T_{ox2}^{2}\right) - \hat{\kappa}_{ox}^{2} = -A_{2}^{2}; \\ A_{3}^{2} \cdot \omega_{3}^{4} \cdot \hat{T}_{ox1}^{2} \cdot \hat{T}_{ox2}^{2} + A_{3}^{2} \cdot \omega_{3}^{2} \cdot \left(T_{ox1}^{2} + T_{ox2}^{2}\right) - \hat{\kappa}_{ox}^{2} = -A_{3}^{2}; \end{cases}$$
(2.5)

де  $\omega_i$  – частота вхідного гармонійного сигналу;

A<sub>i</sub> – відношення амплітуд вихідного та вхідного гармонійних сигналів ВЕ, що відповідають ω<sub>i</sub>;

 $\hat{T}_{ox1}$  і  $\hat{T}_{ox2}$  – оціночні значення сталих часу ВЕ для каналу холодного потоку повітря.

На рис. 2.16 наведено графік АЧХ ВЕ із зазначеними групами різних контрольних точок (ω<sub>i</sub>; A<sub>i</sub>), які необхідні для вирішення системи рівнянь (2.5).

Вирішуючи систему рівнянь (2.5) для вибраної групи точок, визначаються параметри  $\hat{k}_{ox}$ ,  $\hat{T}_{ox1}$ ,  $\hat{T}_{ox2}$  моделі ВЕ. Тоді можна визначити такі частоти  $\omega_i$ , за яких шукані параметри будуть найбільш наближені до їх реальних значень.



Рис. 2.16. Графік АЧХ ВЕ з різним розташуванням контрольних точок (ω; Ai)

Значення параметрів вихідної передавальної функції (2.4) можна однозначно визначити, якщо:

1) однією з контрольних точок є точка при  $\omega_1 \to 0$ , яка характеризує коефіцієнт передачі  $\hat{\kappa}_{ox}$ ;

2) інші контрольні точки мають значення абсциси  $\omega_2 = 1/\hat{T}_{ox1}$  і  $\omega_3 = 1/\hat{T}_{ox2}$  для визначення сталих часу.

Отже, розрахувати коефіцієнт передачі можна за графіком АЧХ, і тоді залишається задача визначення  $\omega_2$  і  $\omega_3$  при умові, що значення  $\hat{T}_{ox1}$  і  $\hat{T}_{ox2}$  невідомі.

Недоліком такого методу є необхідність у структурі математичної моделі та невизначеність параметрів при розв'язанні відповідної системи рівнянь.

Іншим варіантом визначення математичної моделі ВЕ є використання експериментальної ЛАЧХ, що також передбачає пошук точок перегину, частот сполучення. Вони чітко можуть бути відображені на асимптотичній ЛАЧХ, проте на експериментальній характеристиці вони виражені неявно.

За експериментальні ЛАЧХ були взяті результати досліджень, представлені в роботі [75]. Отримані характеристики дозволяють визначити структуру та параметри математичної моделі об'єкта управління у вигляді роботі передавальних функцій. Однак при 3 експериментальними характеристиками вирішення цього завдання є неоднозначним, оскільки потрібно визначити розташування частот сполучення.

У роботі [75] пропонувалося використовувати похідні ЛАЧХ за частотою вхідного сигналу. У результаті проведеного аналізу взаємного впливу частот сполучення було виявлено, що він позначається на аналіз експериментальних частотних характеристик. Проте недоліком цього методу є те, що одержувана передатна функція має дробовий показник ступеня. Такий вигляд математичної моделі суттєво ускладнює подальшу роботу з нею.

З метою спрощення математичної моделі ВЕ був вдосконалений описаний вище метод завдяки використанню похідних полінома як результату інтерполяції експериментальних ЛАЧХ [74]. Проводиться інтерполяція вихідного графіка полінома (n–1) порядку, де n – кількість експериментальних точок на графіку експериментальної ЛАЧХ. Тоді для графіка (рис. 2.17), побудованого за 8 експериментальними точками при P<sub>cт</sub> = 6 атм, можна отримати поліном сьомого порядку:

$$y = p_7 x^7 + p_6 x^6 + p_5 x^5 + p_4 x^4 + p_3 x^3 + p_2 x^2 + p_1 x + p_0, \qquad (2.6)$$

де p<sub>i</sub> – коефіцієнти полінома.



Рис. 2.17. Графіки експериментальної ЛАЧХ (а) та полінома сьомого порядку (б)

Для пошуку частот сполучення використовуватимуться похідні полінома сьомого порядку (2.6). Для цього полінома визначено наступне [75]: графік першої похідної (поліном шостого порядку) (рис. 2.18, а) може бути використаний для ідентифікації моделі з найбільш високою точністю графік третьої похідної (поліном четвертого порядку) (рис. 2.18, б) – з меншою точністю, графік п'ятої похідної (поліном другого порядку) (рис. 2.18, в) – з найменш високою (для цього полінома) точністю. У той самий час графіку п'ятої

похідної (поліном другого порядку) (рис. 2.18, в) дозволяє сформувати найпростішу структуру математичної моделі, графік першої похідної (поліном шостого порядку) (рис. 2.18, а) – сформувати найскладнішу структуру.

Частоти сполучення обчислюються за аналогією з алгоритмом, описаним у роботі [76]: якщо графік має локальний мінімум, значення якого є від'ємним, то він визначає полюс шуканої передавальної функції; якщо графік має локальний максимум, значення якого є додатним, то в цій точці знаходиться нуль передавальної функції. Інші локальні екстремуми не визначають наявність частот сполучення.



Рис. 2.18. Графіки першої похідної як полінома шостого порядку (а), третьої похідної як полінома четвертого порядку (б) та п'ятої похідної як полінома другого порядку (в)

Виходячи з цього, на графіку першої похідної полінома (рис. 2.18, а) явно виражені три локальні мінімуми з від'ємними значеннями і два локальні максимуми з від'ємними значеннями. Тому лише локальні мінімуми свідчать про наявність трьох полюсів; значення логарифмічних частот сполучення: -1,642, -0,914, -0,028. На графіку третьої похідної полінома (рис. 2.18, б) виражені два локальні мінімуму з від'ємними значеннями і один локальний максимум з додатним значенням. Локальні мінімуми свідчать про наявність двох полюсів; значення логарифмічних частот сполучення: -1,389, -0,39. Локальний максимум свідчить про наявність нуля; значення логарифмічної частоти сполучення: -0,93.

Графік п'ятої похідної полінома (рис. 2.18, в) має один локальний мінімум із від'ємним значенням. Він свідчить про наявність полюса; значення логарифмічної частоти сполучення: -0,903. В цьому випадку стала часу буде дорівнювати 8 с.

У якості математичної моделі обрані аперіодичні та форсуючі ланки першого порядку для кожної відповідної частоти сполучення. Графіки розрахункових ЛАЧХ представлені на рис. 2.19.



Рис. 2.19. Графіки експериментальної ЛАЧХ (а), розрахункових ЛАЧХ, отриманих з графіка полінома шостого (б), полінома четвертого (в) та полінома другого (г) порядків

Таким чином, при виборі графіка з одним локальним екстремумом (рис. 2.18, в) математичну модель ВЕ для каналів холодного і гарячого потоків повітря можна представити у вигляді відповідних передавальних функцій:

$$\begin{cases} W_{ox}(s) = \frac{T_{x}(s)}{Z(s)} = \frac{\kappa_{ox}}{T_{ox}s+1}; \\ W_{or}(s) = \frac{T_{r}(s)}{Z(s)} = \frac{\kappa_{or}}{T_{or}s+1}, \end{cases}$$
(2.7)

де коефіцієнти передачі визначаються зі статичних характеристик (рис. 2.14 і 2.15):

− при 7 атм: к<sub>ох</sub> = -14,16 і 12,76 °С/мм і к<sub>ог</sub> = -29,94 і -7,73 °С/мм,

а структура передавальної функції та сталі часу T<sub>ox</sub> = T<sub>or</sub> = 8 с визначаються за допомогою похідних графіків експериментальних ЛАЧХ (рис. 2.18).

Висновки до розділу 2

1. Розроблено графічну та CFD моделі BE. Описано процес вихрового поділу, виходячи з результатів обчислювальних експериментів за допомогою моделі CFD.

2. Розроблено функціональну та структурну схеми ВЕ як працездатного ОАУ. Наведено математичні моделі привода та датчиків температури.

3. Розроблено процедури апроксимації статичних характеристик ВЕ з використанням CFD моделі. Розроблені процедури лінеаризації дозволяють визначати необхідні атрибути математичної моделі ВЕ як ОАУ.

4. Удосконалено метод структурно-параметричної ідентифікації за експериментальними частотними характеристиками ВЕ як ОАУ завдяки використанню похідних апроксимаційного полінома, що дозволяє обчислювати з достатнім ступенем точності нулі та полюси передавальних функцій, які описують процеси перетворення переміщення вентиля у температуру холодного та гарячого потоків повітря.

#### РОЗДІЛ З

# ДІАГНОСТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВИХРОВИМ ЕНЕРГОРОЗДІЛЬНИКОМ

3.1. Формування структури раціональної системи управління

У відомих конструкціях агрегатів кондиціювання використовуються однорежимні ВЕ, функціонування яких здійснюється з використанням принципу управління за задавальним впливом [20, 21, 23, 24]. Неминучий вплив дестабілізуючих впливів, таких як зміна зовнішніх умов функціонування, параметрів стисненого повітря та внутрішніх факторів, зумовлених зміною характеристик вихрового процесу, призводить до суттєвого погіршення показників якості кондиціювання.

Підвищення показників якості кондиціювання можливе за допомогою принципу управління з відхилення [39]. Разом із тим, істотного підвищення показників якості досягти неможливо через нестабільність процесу ВЕ, зміну характеристик привода і датчиків температури, а також обмежені можливості принципу управління за відхиленням парирувати значні зміни процесу вихрового енергетичного поділу.

Досягти високої якості вихрового енергетичного поділу можна з використанням нового принципу управління за діагнозом [77]. Використання цього принципу дозволяє сформувати раціональне управління, здатне виявляти причини порушення показників якості, тобто працездатності ВЕ, і надалі відновлювати його нормальне функціонування для ширшого діапазону дестабілізуючих впливів.

Раціональне управління є одним із підходів адаптивного управління об'єктами і процесами з суттєвою невизначеністю параметрів [77]. В основі раціонального управління – припущення про невизначеність дестабілізуючих впливів, що порушують працездатність ОАУ. Невизначеність дестабілізуючих

впливів обумовлена невідомістю моменту появи дестабілізуючого впливу, конструктивної частини ОАУ, де вона з'явилася, типу дестабілізації, до якого належить, а також невідомістю конкретної величини впливу. Дестабілізуючі впливи – це різні неконтрольовані збурюючі впливи, шуми, перешкоди, дефекти, несправності та відмови. Передбачається, що множина дестабілізуючих впливів кінцева. Елементи множини – це конкретні фізичні види дестабілізуючих впливів, що призводять до зміни параметрів діагностичних моделей.

Стосовно завдання автоматичного управління ВЕ, раціональна система управління складається з двох підсистем [78]. Перша підсистема – це об'єкт раціонального управління (ОРУ), друга – пристрій раціонального управління (ПРУ), які з'єднані між собою сигнальними зв'язками. Функціональна схема раціональної системи управління наведена на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Функціональна схема раціональної системи управління

ОРУ представляє собою ОАУ (рис 2.11), на кожен функціональний елемент якого діє множина неконтрольованих дестабілізуючих впливів  $D_i$ ,  $i = \overline{1,4}$ .

ПРУ складається з програмних модулів діагностики та управління, що реалізуються на мікропроцесорі. У модулі діагностики за дискретним сигналом управління u(kT<sub>0</sub>), цифровим сигналам датчиків температури u<sub>дx</sub>(kT<sub>0</sub>) і u<sub>дr</sub>(kT<sub>0</sub>) та цифровому сигналу датчика положення привода  $u_{\zeta}(kT_0)$  формується діагноз функціонального стану ОРУ у формі оцінок характеристик дестабілізуючих впливів  $\hat{D}$ . У модулі управління формується управляючий вплив  $u_y(kT_0)$ , який відновлює працездатність ОРУ за результатами його діагностування.

Ключовим у функціональній схемі (рис. 3.1) є модуль діагностики. Для формування діагнозу ОРУ потрібно виявити поточний дестабілізуючий вплив, локалізувати та ідентифікувати його за допомогою пошуку дестабілізованого функціонального елемента, визначення типу та встановлення його конкретного виду.

Виявлення дестабілізуючого впливу – встановлення факту відхилення у працездатності ОРУ.

Локалізація полягає в пошуку функціонального елемента, що знаходиться від впливом дестабілізуючого впливу.

Тип – це група дестабілізуючих впливів, що призводять до однотипного характеру порушення працездатності ОРУ.

Вид дестабілізуючого впливу – це конкретний фізичний прояв цього впливу, що усувається за допомогою ресурсів відновлення працездатності.

Таким чином, у модулі діагностики проводиться діагностування, що є процесом послідовного встановлення факту появи дестабілізації, місця її дії, визначення типу та встановлення конкретного виду дестабілізуючого впливу.

Основним кількісним показником якості діагностування  $\epsilon$  час діагностування ( $\Delta t_{d}$ ) — час, що витрачається на обробку сигналів для встановлення повного діагнозу: від моменту фактичного перевищення допуску на відхилення значень вихідних сигналів від необхідних значень до визначення виду дестабілізуючого впливу.

У представленій функціональній схемі ОРУ відрізняється від традиційних класичних ОАУ. Разом з необхідними властивостями керованості та спостережуваності ОРУ повинен мати властивості, що забезпечують діагностованість та відновлюваність його працездатності.

Під діагностованістю розуміється властивість, що полягає в можливості однозначного встановлення причини появи дестабілізуючого впливу доступних вимірювання сигналів за кінцевий час. Під відновлюваністю розуміється властивість ОРУ, що дозволяє за допомогою апаратних та програмних засобів парирувати дестабілізуючі впливи за кінцевий час [77].

При переході від передавальної функції ОРУ до опису у кінцево-різницевій формі необхідно використовувати передавальну функцію фіксатора нульового порядку [78] при використанні приводів з аналоговим входом. У функціональній схемі, що розглядається (рис. 3.1) в якості виконавчого механізму виступає КД з імпульсним управлінням, тому нехтування застосуванням фіксатора нульового порядку обґрунтоване.

На основі структурної схеми ОАУ (рис. 2.13), функціональні елементи якого описуються передавальними функціями (2.2, 2.3, 2.7), номінальний режим ОРУ, тобто без урахування дії дестабілізуючих впливів у просторі станів, можна описати системою рівнянь [79]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1}(t) \\ \dot{x}_{2}(t) \\ \dot{x}_{3}(t) \\ \dot{x}_{4}(t) \\ \dot{x}_{5}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\kappa_{ox}}{T_{ox}} & -\frac{1}{T_{ox}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\kappa_{\pi}}{T_{\pi}} & -\frac{1}{T_{\pi}} & 0 & 0 \\ \frac{\kappa_{or}}{T_{or}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{or}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\kappa_{\pi}}{T_{\pi}} & -\frac{1}{T_{\pi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{1}(t) \\ x_{2}(t) \\ x_{3}(t) \\ x_{4}(t) \\ x_{5}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \kappa_{np} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_{y}(t);$$
(3.1)

$$\begin{bmatrix} x_{1}(0) \\ x_{2}(0) \\ x_{3}(0) \\ x_{4}(0) \\ x_{5}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \\ x_{40} \\ x_{50} \end{bmatrix}; \qquad \begin{bmatrix} u_{x}(t) \\ u_{r}(t) \\ u_{\zeta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \kappa'_{np} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{1}(t) \\ x_{2}(t) \\ x_{3}(t) \\ x_{4}(t) \\ x_{5}(t) \end{bmatrix}.$$

Для опису ОРУ у дискретному просторі станів можна використовувати формулу Ейлера, згідно з якою

$$\dot{x}(t) \approx \frac{x[(k+1)T_0] - x(kT_0)}{T_0},$$
 (3.2)

де k = 0, 1, 2, ... - номер дискретного кроку;

То – період дискретизації.

Застосувавши рівняння (3.2) до рівняння (3.1), можна отримати систему кінцево-різницевих рівнянь виду:

$$\begin{bmatrix} x_{1} [(k+1)T_{0}] \\ x_{2} [(k+1)T_{0}] \\ x_{3} [(k+1)T_{0}] \\ x_{5} [(k+1)T_{0}] \\ x_{5} [(k+1)T_{0}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T_{0}}{T_{0x}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\kappa_{ax}T_{0}}{T_{ax}} & 1 - \frac{T_{0}}{T_{ax}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T_{0}}{T_{0r}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\kappa_{ar}T_{0}}{T_{arr}} & 1 - \frac{T_{0}}{T_{arr}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{1}(kT_{0}) \\ x_{2}(kT_{0}) \\ x_{5}(kT_{0}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \kappa_{inp}T_{0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_{y}(kT_{0});$$

$$\begin{bmatrix} x_{1}(0) \\ x_{2}(0) \\ x_{3}(0) \\ x_{4}(0) \\ x_{5}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \\ x_{40} \\ x_{50} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} u_{x}(kT_{0}) \\ u_{r}(kT_{0}) \\ u_{\zeta}(kT_{0}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{1}(kT_{0}) \\ x_{2}(kT_{0}) \\ x_{3}(kT_{0}) \\ x_{3}(kT_{0}) \\ x_{4}(kT_{0}) \\ x_{5}(kT_{0}) \end{bmatrix}.$$
(3.3)

Систему рівнянь (3.3) можна представити в більш лаконічній формі, опустивши для простоти опису параметр T<sub>0</sub> і використовуючи векторноматричні позначення, тоді

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + b \cdot u_{y}(k);$$
  

$$x(0) = x_{0};$$
  

$$u(k) = C \cdot x(k),$$
  
(3.4)

де x(k) – вектор стану; dim[x(k)] = 5;

А, b і С – матриці відповідних розмірностей;

u(k) – вектор вимірювань; dim[u(k)] = 3;

 $u_y(k)$  – вектор управління; dim $[u_y(k)] = 1$ .

У дискретному просторі станів опису перетворювальних властивостей ОРУ можна подати за допомогою структурної схеми, наведеної на рис. 3.2 [78].

На рис. 3.2 позначено:

- к'<sub>пр</sub> коефіцієнт передачі датчика положення;
- x<sub>1</sub>(k) змінна стану привода;
- x<sub>2</sub>(k) змінна стану каналу холодного потоку повітря;
- x<sub>3</sub>(k) змінна стану датчика температури холодного потоку повітря;
- x<sub>4</sub>(k) змінна стану каналу гарячого потоку повітря;
- x<sub>5</sub>(k) змінна стану датчика температури гарячого потоку повітря;
- Т<sub>0</sub> період дискретизації.



Рис. 3.2. Структурна схема номінального режиму ОРУ в дискретному просторі станів

Наведена структурна схема дозволяє якісно оцінити такі властивості ОРУ як керованість і спостережуваність, не використовуючи аналітичних критеріїв Р. Калмана [80]. Очевидно, що управляючий вплив діє на всі змінні стану  $x_1(k)$ ,  $x_2(k)$  і  $x_3(k)$ , а також, що всі зміни змінних стану доступні вимірюванням за допомогою вектора u(k).

На рис. 3.3 представлена структурна схема ОРУ, що відображає дію дестабілізуючих впливів на структуру та параметри номінальної моделі кожного функціонального елемента. У роботі розглядаються такі дестабілізуючі впливи, що призводять до зміни наступних параметрів у:

1) приводі – зміна коефіцієнта передачі та дрейф нуля;

2) ВЕ – зміни коефіцієнтів передачі та сталих часу, дрейф робочої точки;

3) датчиках температури холодного і гарячого потоків повітря – зміни коефіцієнтів передачі, дрейф нуля та зміни сталих часу.

Представлені математичні моделі лінійного наближення ОРУ у номінальному режимі його функціонування дозволяють перейти до формування діагностичних моделей, що відображають дію дестабілізуючих впливів на доступні вимірюванню сигнали.

Діагностичне забезпечення ОРУ складається з математичних моделей, що описують номінальні режими функціональних елементів і всього об'єкта управління, діагностичних моделей, що відображають зв'язок непрямих ознак діагностування з прямими, алгоритмів обчислення непрямих та прямих ознак діагностування, двозначних предикатних рівнянь і дихотомічного дерева.

Діагностичне забезпечення ОРУ розробляється у вигляді послідовного розв'язання таких задач [81]:

- 1) виявлення дестабілізації;
- 2) пошук місця дестабілізованого функціонального елемента;
- 3) встановлення типу дестабілізуючого впливу;
- 4) визначення виду дестабілізуючого впливу;
- 5) формування дихотомічного дерева діагностування.



Рис. 3.3. Структурна схема нештатних режимів ОРУ

Для вирішення цих завдань потрібно сформувати відповідні діагностичні моделі — математичні моделі, що відображають зв'язок прямих ознак дестабілізуючих впливів з доступними виміру непрямими ознаками.

#### 3.2. Формування діагностичних моделей

#### 3.2.1. Вирішення задачі виявлення дестабілізації

Задача виявлення полягає у встановленні факту появи порушень у працездатності ОРУ. Вирішення цієї задачі сформовано на підставі моделі ОРУ з позаштатним функціонуванням (рис. 3.1) та еталонної моделі ОАУ (рис. 2.11), що відображає номінальний режим функціонування у цифровій формі. Графічно процес виявлення дестабілізації можна представити функціональною схемою (рис. 3.4). У наступному її поданні для спрощення запису змінних опущено T<sub>0</sub>.



Рис. 3.4. Функціональна схема процесу виявлення дестабілізації

На рис. 3.4 позначено:

- ũ(k) – вектор вихідних сигналів ОРУ;

– û(k) – вектор вихідних сигналів еталонної ОАУ як їх оціночних значень;

- ∆u(k) – вектор різницевого сигналу.

Модель ОРУ у загальному випадку описується векторно-матричним рівнянням виду:

$$\tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{k}+1) = \tilde{\mathbf{A}} \cdot \tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{k}) + \mathbf{A} \cdot \tilde{\mathbf{x}}_{0} + \tilde{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{u}(\mathbf{k});$$
  

$$\tilde{\mathbf{x}}(0) = \tilde{\mathbf{x}}_{0};$$
  

$$\tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{k}) = \tilde{\mathbf{C}} \cdot \tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{k}),$$
(3.5)

де  $\tilde{x}(k)$  – вектор збуреного стану ОРУ,  $\tilde{u}(k)$  – вектор збурених вимірювань,  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{b}$  і  $\tilde{C}$  – матриці значень параметрів непрацездатного стану ОРУ,  $\tilde{x}_0$  – вектор зміщення робочих точок функціональних елементів ОРУ.

Еталонну модель ОАУ у загальному випадку можна подати у вигляді векторно-матричного рівняння:

$$\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{k}+1) = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}}(\mathbf{k}) + \mathbf{b} \cdot \mathbf{u}_{\mathbf{y}}(\mathbf{k});$$

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_{0};$$

$$\hat{\mathbf{u}}(\mathbf{k}) = \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{x}}(\mathbf{k}),$$
(3.6)

де  $\hat{x}(k)$  – вектор еталонного стану ОАУ,  $\hat{u}(k)$  – вектор еталонних вимірювань.

З появою в ОРУ дестабілізуючих впливів змінюється вектор вимірювань  $\tilde{u}(k)$  відносно еталонної поведінки  $\hat{u}(k)$ . Різницевий сигнал  $\Delta u(k)$  представляє собою алгебраїчну різницю рівнянь (3.5) і (3.6) та описується таким кінцеворізницевим рівнянням:

$$\Delta x (k+1) = \Delta A \cdot \tilde{x} (k) + A \cdot \tilde{x}_{0} + \Delta b \cdot u (k);$$
  

$$\Delta x (0) = 0;$$
  

$$\Delta u (k) = \Delta C \cdot \tilde{x} (k),$$
(3.7)

де  $\Delta A$ ,  $\Delta b$  і  $\Delta C$  – матриці відхилень параметрів від їх номінальних значень.

Рівняння (3.7) є рівнянням діагностичної моделі, що зв'язує відхилення вектора вимірювань  $\Delta u(k)$  з відхиленнями параметрів  $\Delta A$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta C$  і  $\tilde{x}_0$ . Для встановлення факту появи непрацездатного стану ОРУ використовується двозначне предикатне рівняння:

$$z_0 = S_2 \left\{ \left| \tilde{u} \left( k T_0 \right) - \hat{u} \left( k T_0 \right) \right| \ge \delta_0 \right\}, \quad k = \overline{k_1, k_2}, \quad p,$$
(3.8)

де  $z_0$  – логічна змінна,  $S_2$  – символ двозначного предиката,  $\delta_0$  – допуск на відхилення, р – коефіцієнт довіри, який використовується для визначення значення логічної ознаки для виключення помилкових або зашумлених дискретних значень відхилення  $\Delta u(kT_0)$ , за яких порушується виконання умови предиката на інтервалі [k<sub>1</sub>; k<sub>2</sub>].

Таким чином, якщо абсолютне значення різницевого сигналу  $\Delta u(kT_0)$  стане рівним або перевищить величину допуску  $\delta_0$ , то при цьому  $z_0 = 1$  буде вказувати на непрацездатний стан ОРУ. В іншому випадку,  $z_0 = 0$ , визначено його працездатність.

Наступним кроком після встановлення факту наявності дестабілізації у працездатності ОРУ  $z_0 = 1 \epsilon$  пошук місця її виникнення, тобто визначення непрацездатного функціонального елемента ОРУ.

### 3.2.2. Пошук місця дестабілізації

Задача пошуку місця дестабілізації пов'язане із знаходженням несправного функціонального елемента ОРУ за допомогою дихотомічних процедур, припускаючи, що в період діагностування може з'явитися лише один дестабілізуючий вплив. Задача пошуку вирішується шляхом використання еталонних моделей функціональних елементів ОРУ та вектора вимірювань ũ(k), що забезпечує діагностованість ОРУ, тобто можливість однозначної ідентифікації місця дестабілізації.

Номінальний режим роботи привода описується наступним рекурентним рівнянням, виходячи з рис. 3.2,

$$\hat{\mathbf{u}}_{\zeta}\left(\mathbf{k}+1\right) = \hat{\mathbf{u}}_{\zeta}\left(\mathbf{k}\right) + \kappa_{\mathrm{np}} \mathbf{T}_{0} \mathbf{u}_{\mathrm{y}}\left(\mathbf{k}\right). \tag{3.9}$$

У роботі у якості дестабілізованих параметрів привода розглядаються зміна коефіцієнта передачі  $\tilde{\kappa}_{np}$  та появі дрейфу нуля  $u_{\zeta 0}$ . Тоді рівняння збуреного руху привода буде мати вид:

$$\tilde{\mathbf{u}}_{\zeta}\left(\mathbf{k}+1\right) = \tilde{\mathbf{u}}_{\zeta}\left(\mathbf{k}\right) + \tilde{\kappa}_{\mathrm{np}} \mathbf{T}_{0} \mathbf{u}_{\mathrm{y}}\left(\mathbf{k}\right) + \mathbf{u}_{\zeta 0}.$$
(3.10)

Для локалізації непрацездатного стану привода використовується діагностична модель, що описується рівнянням, отриманим почленним відніманням рівняння працездатного стану (3.9) з рівняння (3.10):

$$\Delta u_{\zeta}(k+1) = \Delta u_{\zeta}(k) + \Delta \kappa_{np} T_0 u_y(k) + u_{\zeta 0}. \qquad (3.11)$$

Непрацездатний та працездатний стани встановлюються за допомогою логічної змінної, значення якої визначається двозначним предикатним рівнянням:

$$z_1 = S_2\left\{ \left| \Delta u_{\zeta}\left( k \right) \right| \ge \delta_1 \right\}, \ k = \overline{k_1, k_2}, \ p, \tag{3.12}$$

де  $\delta_1$  – допуск на відхилення значення модуля  $\Delta u_{\zeta}(k)$ .

Результат  $z_1 = 1$  означає непрацездатний стан привода. Якщо  $z_1 = 0$ , то робиться висновок про те, що привод працездатний.

Для пошуку дестабілізації у ВЕ та в датчиках температури використовується еталонна модель (3.6) при цьому двозначні предикати рівняння формуються з використанням компонентів вектора вимірювань ũ(k). Так, для датчика температури холодного потоку повітря

$$z_2 = S_2 \left\{ \left| \tilde{u}_{dx} \left( k \right) - \hat{u}_{dx} \left( k \right) \right| \ge \delta_2 \right\}, \ k = \overline{k_3, k_4}, \ p, \tag{3.13}$$

і для датчика температури гарячого потоку повітря

$$z_{3} = S_{2} \left\{ \left| \tilde{u}_{\mathcal{A}\Gamma} \left( k \right) - \hat{u}_{\mathcal{A}\Gamma} \left( k \right) \right| \ge \delta_{3} \right\}, \ k = \overline{k_{3}, k_{4}}, \ p,$$
(3.14)

де  $\delta_2$  і  $\delta_3$  – допуски на відхилення значень модулів відповідної різниці.

Тоді, якщо  $z_2 = 1$  і  $z_3 = 1$ , то дестабілізація виникла в ВЕ. Комбінація  $z_2 = 1$ і  $z_3 = 0$  вказує на дестабілізацію датчика температури холодного потоку повітря. Комбінація  $z_2 = 0$  і  $z_3 = 1$  вказує на дестабілізацію датчика температури гарячого потоку повітря.

Таким чином, використання логічних ознак z<sub>1</sub>, z<sub>2</sub> і z<sub>3</sub> дозволяє реалізувати пошук несправного функціонального елемента.

#### 3.2.3. Встановлення типу дестабілізації

Наступним етапом діагностування причини дестабілізації буде встановлення типу дестабілізації в ідентифікованому функціональному елементі ОРУ. Задача цього етапу – знаходження параметрів, що характеризують тип дестабілізації. Вирішення здійснюється за допомогою використання непрямих доступних вимірюванням, завдяки формується ознак, яким множина предикатних рівнянь, які однозначно встановлюють тип дестабілізуючого впливу.

Як було описано вище, у якості прямих ознаки дестабілізації привода розглядаються зміна коефіцієнта передачі  $\tilde{\kappa}_{np}$  і дрейф нуля  $u_{\zeta 0}$ . Грунтуючись на припущенні про одноразовість відмов, діагностичну модель (3.11) можна представить для кожного типу дестабілізації окремо. Так, функціональну діагностичну модель, яка відображає зв'язок непрямої ознаки  $\Delta u_{\zeta}(k)$  дестабілізації з прямою ознакою  $u_{\zeta 0}$  можна представить як

$$\Delta u_{\zeta} \left( k+1 \right) = \Delta u_{\zeta} \left( k \right) + u_{\zeta 0}, \qquad (3.15)$$

тоді, дрейф нуля можна визначити як

$$\mathbf{u}_{\zeta 0} = \Delta \mathbf{u}_{\zeta} \left( \mathbf{k} \right). \tag{3.16}$$

Оскільки дрейф нуля не змінюється на інтервалі діагностування через припущення про квазістаціонарність, то аргумент для двозначного предикатного рівняння буде представлений як

$$\Delta u_{\zeta}(k+1) = \Delta u_{\zeta}(k). \qquad (3.17)$$

На привод діють лише два типи дестабілізації, тому для однозначного встановлення використовується двозначне предикатне рівняння

$$z_{11} = S_2 \left\{ \left| \Delta u_{\zeta} \left( k+1 \right) - \Delta u_{\zeta} \left( k \right) \right| \ge \delta_{11} \right\}, \quad k = \overline{k_4, k_5}, \quad p, \tag{3.18}$$

де  $\delta_{11}$  – допуск на відхилення модуля різниці.

Таким чином, якщо  $z_{11} = 0$ , то це означає, що в приводі присутній дрейф нуля  $u_{\zeta 0}$ , у випадку  $z_{11} = 1$  регіструється відхилення коефіцієнта передачі  $\tilde{\kappa}_{np}$ . Дестабілізація у функціонуванні ВЕ призводить до змін параметрів математичних моделей як холодного, так гарячого потоків повітря. За аналогією з приводом для ВЕ можна виділити три пари типів дестабілізації: зміна коефіцієнтів передачі  $\kappa_{ox}$  і  $\kappa_{or}$ , сталих часу  $T_{ox}$  і  $T_{or}$  та дрейфів робочих точок  $\theta_{ox}$  і  $\theta_{or}$ . Встановлювати ці типи дестабілізації можна, використовуючи лише моделі одного з каналів, тому у ролі основного каналу розглядається канал холодного потоку повітря.

Рівняння еталонної моделі ВЕ буде мати вигляд

$$\hat{x}_{2}(k+1) = \frac{T_{0}}{T_{ox}} \kappa_{ox} x_{1}(k) + \frac{T_{ox} - T_{0}}{T_{ox}} \hat{x}_{2}(k)$$
(3.19)

і рівняння руху за зміни коефіцієнта передачі  $\tilde{\kappa}_{ox}$  буде мати вигляд

$$\tilde{x}_{2}(k+1) = \frac{T_{0}}{T_{ox}} \tilde{\kappa}_{ox} x_{1}(k) + \frac{T_{ox} - T_{0}}{T_{ox}} \tilde{x}_{2}(k).$$
(3.20)

Ці рівняння дозволяють сформувати функціональну діагностичну модель виду:

$$\Delta x_{2}(k+1) = \frac{T_{0}}{T_{ox}} \Delta \kappa_{ox} x_{1}(k) + \frac{T_{ox} - T_{0}}{T_{ox}} \Delta x_{2}(k).$$
(3.21)

Дискретний сигнал  $\tilde{x}_2(k)$  обчислюється за допомогою рівняння, що пов'язує  $x_3(k)$  із  $u_{dx}(k)$  в системі кінцево-різницевих рівнянь (3.3).

З рівняння (3.21) пряма діагностична ознака типу  $\Delta \kappa_{ox}$  описується наступним відношенням:

$$\Delta \kappa_{\text{ox}} = \frac{T_{\text{ox}} \Delta x_2 (k+1)}{T_0 x_1 (k)} - \frac{(T_{\text{ox}} - T_0) \Delta x_2 (k)}{T_0 x_1 (k)}.$$
(3.22)

Умова квазістаціонарності ознаки дозволяє сформувати таке рівняння:

$$\frac{(T_{ox}+T_0)\Delta x_2(k+1) - T_{ox}\Delta x_2(k)}{x_1(k)} = \frac{(T_{ox}+T_0)\Delta x_2(k+2) - T_{ox}\Delta x_2(k+1)}{x_1(k+1)},$$
(3.23)

з кого формується аргумент для двозначного предикатного рівняння:

$$\gamma_{31}(k+2) = \left[ T_{ox} \Delta x_{2}(k+1) - (T_{ox} - T_{0}) \Delta x_{2}(k) \right] \cdot x_{1}(k+1) - \left[ T_{ox} \Delta x_{2}(k+2) - (T_{ox} - T_{0}) \Delta x_{2}(k+1) \right] \cdot x_{1}(k),$$
(3.24)

тоді предикатне рівняння буде мати вигляд

$$z_{31} = S_2 \{ |\gamma_{31}(k+2)| \ge \delta_{31} \}, \quad k = \overline{k_4, k_5}, \quad p,$$
 (3.25)

де  $\delta_{31}$  – допуск на відхилення модуля  $\gamma_{31}(k+2)$ .

Якщо  $z_{31} = 0$ , то дестабілізація викликана зміною коефіцієнта передачі  $\Delta \kappa_{ox}$ , при  $z_{31} = 1$  дестабілізація викликана типами  $\Delta T_{ox}$  або  $\theta_{ox}$ .

Для встановлення типів дестабілізації ВЕ, пов'язаних зі зміною інерційних властивостей — ознака  $\Delta T_{ox}$  — та дрейфом робочої точки — ознака  $\theta_{ox}$ , — можна скористатися функціональною діагностичною моделлю для дрейфу

$$\Delta x_2 \left(k+1\right) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ox}}\right) \Delta x_2 \left(k\right) + \theta_{ox}, \qquad (3.26)$$

яка відображає зв'язок прямої ознаки типу дестабілізації θ<sub>ox</sub> з непрямою ознакою Δx<sub>2</sub>(k). Тоді пряма ознака дестабілізації визначатиметься як

$$\theta_{\rm ox} = \Delta x_2 \, (k). \tag{3.27}$$

Величина ознаки суттєво не змінюється на інтервалі діагностування, тому справедливий наступний вираз:

$$\theta_{\rm ox} = \Delta x_2 \, (k+1). \tag{3.28}$$

Скориставшись умовою квазістаціонарності, можна сформувати аргумент двозначного предикатного рівняння:

$$\gamma_{32}(k+2) = \Delta x_2(k+1) - \Delta x_2(k), \qquad (3.29)$$

тоді предикатне рівняння буде представлено як

$$z_{32} = S_2 \{ |\gamma_{32}(k+2)| \ge \delta_{32} \}, \quad k = \overline{k_4, k_5}, \quad p,$$
 (3.30)

де  $\delta_{32}$  – допуск на відхилення модуля  $\gamma_{32}(k+2)$ .

Якщо виконується умова зміни аргументу, тоді  $z_{32} = 0$  вказує на наявність дрейфу робочої точки  $\theta_{ox}$ . Оскільки для аналізу було введено таке обмеження, що на ВЕ діють лише три різних типи дестабілізації, то  $z_{32} = 1$  свідчить про зміну інерційних властивостей  $\Delta T_{ox}$ .

Дестабілізація працездатності датчика температури холодного повітря також може бути зведена до трьох типів: зміни коефіцієнта передачі Δ<sub>κ<sub>дx</sub></sub>, зміні сталої часу ΔT<sub>дx</sub> і дрейфу нуля u<sub>дx</sub>.

Для встановлення типу дестабілізації, що призводить до зміни коефіцієнта передачі  $\Delta \kappa_{dx}$ , необхідно використовувати рівняння еталонної моделі датчика:

$$\hat{x}_{3}(k+1) = \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\text{ff}x}}\right) \hat{x}_{3}(k) + \frac{\kappa_{\text{ff}x}T_{0}}{T_{\text{ff}x}} x_{2}(k)$$
(3.31)

і рівняння збуреного руху

$$\tilde{x}_{3}(k+1) = \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\text{dx}}}\right) \tilde{x}_{3}(k) + \frac{\tilde{\kappa}_{\text{dx}}T_{0}}{T_{\text{dx}}} x_{2}(k).$$
(3.32)

Відповідно, функціональна діагностична модель матиме вигляд

$$\Delta x_3(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{dx}}\right) \Delta x_3(k) + \frac{\Delta \kappa_{dx} T_0}{T_{dx}} x_2(k).$$
(3.33)

Змінна x<sub>2</sub>(k) відповідає температурі холодного потоку повітря. Температура холодного повітря пов'язана з температурою гарячого потоку повітря відповідною функціональною залежністю (рис. 2.14, 2.15). Тому скориставшись результатами вимірювань u<sub>дx</sub>(k) та відповідними рівняннями для другого датчика температури можна отримати оціночні значення  $\hat{x}_2(k)$ . Величина прямої ознаки  $\Delta k_{dx}$  визначається наступним виразом:

$$\Delta \kappa_{\pi x} = \frac{\Delta x_3 \left(k+1\right) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{\pi x}}\right) \Delta x_3 \left(k\right)}{\hat{x}_2 \left(k\right)} \cdot \frac{T_{\pi x}}{T_0}.$$
(3.34)

Справедливим є також вираз і для наступних дискретних значень:

$$\Delta \kappa_{\pi x} = \frac{\Delta x_{3} (k+2) - \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\pi x}}\right) \Delta x_{3} (k+1)}{\hat{x}_{2} (k+1)} \cdot \frac{T_{\pi x}}{T_{0}}.$$
(3.35)

## Умова квазістаціонарності ознаки дозволяє сформувати таку рівність

$$\frac{\Delta x_{3}(k+1) - \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{dx}}\right) \Delta x_{3}(k)}{\hat{x}_{2}(k)} = \frac{\Delta x_{3}(k+2) - \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{dx}}\right) \Delta x_{3}(k+1)}{\hat{x}_{2}(k+1)},$$
(3.36)

### з якого можна сформувати аргумент для двозначного предикатного рівняння:

$$\gamma_{33}(k+2) = \left[ \Delta x_{3}(k+2) - \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\pi x}}\right) \Delta x_{3}(k+1) \right] \cdot \hat{x}_{2}(k) - \left[ \Delta x_{3}(k+1) - \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\pi x}}\right) \Delta x_{3}(k) \right] \cdot \hat{x}_{2}(k+1),$$
(3.37)

тоді предикатне рівняння матиме вигляд

$$z_{33} = S_2 \{ |\gamma_{33}(k+2)| \le \delta_{33} \}, \quad k = \overline{k_4, k_5}, \quad p.$$
 (3.38)

де  $\delta_{33}$  – допуск на відхилення модуля  $\gamma_{33}(k+2)$ .

Якщо  $z_{33} = 1$ , то це вказує на зміну коефіцієнта передачі  $\Delta \kappa_{dx}$ . При  $z_{33} = 0$  можливі як  $\Delta T_{dx}$ , так і  $u_{dx}$  типи дестабілізації.

Для однозначного встановлення цих типів дестабілізації можна скористатися функціональною діагностичною моделлю для дрейфу нуля датчика температури:

106

$$\Delta x_{3}(k+1) = \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\text{gx}}}\right) \Delta x_{3}(k) + \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\text{gx}}}\right) u_{\text{gx}}.$$
(3.39)

107

Вираз для прямої ознаки идх буде мати вигляд

$$u_{\mathrm{dx}} = \left[\Delta x_3 \left(k+1\right) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{\mathrm{dx}}}\right) \Delta x_3 \left(k\right)\right] \cdot \frac{T_{\mathrm{dx}}}{T_{\mathrm{dx}} - T_0}.$$
(3.40)

Величина ознаки суттєво не змінюється і для інших значень змінних через квазістаціонарність, тому

$$u_{\mathrm{JX}} = \left[\Delta x_3 \left(k+2\right) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{\mathrm{JX}}}\right) \Delta x_3 \left(k+1\right)\right] \cdot \frac{T_{\mathrm{JX}}}{T_{\mathrm{JX}} - T_0}.$$
(3.41)

Тоді аргумент двозначного предикатного рівняння буде поданий як

$$\gamma_{34}(k+2) = \Delta x_3(k+2) - \left(2 - \frac{T_0}{T_{\text{ff}x}}\right) \Delta x_3(k+1) + \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{ff}x}}\right) \Delta x_3(k), \quad (3.42)$$

а саме предикатне рівняння матиме вигляд

$$z_{34} = S_2 \{ |\gamma_{34}(k+2)| \le \delta_{34} \}, \quad k = \overline{k_4, k_5}, \quad p,$$
 (3.43)

де  $\delta_{34}$  – допуск на відхилення модуля  $\gamma_{34}$  (k+2).

Тоді,  $z_{34} = 1$  вказує на дрейф нуля  $u_{dx}$ , а  $z_{34} = 0$  вказує на зміну інерційності  $\Delta T_{dx}$ .

Доцільно проаналізувати моделі датчика температури гарячого потоку повітря аналогічним чином: зміна коефіцієнта передачі  $\Delta k_{\rm dr}$ , зміні сталої часу  $\Delta T_{\rm dr}$  і дрейфу нуля  $u_{\rm dr}$ .

Тоді тип дестабілізації, що призводить до зміни коефіцієнта передачі Δк<sub>дг</sub>, описується функціональною діагностичною моделлю виду

$$\Delta x_5 \left(k+1\right) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{\mu \Gamma}}\right) \Delta x_5 \left(k\right) + \frac{\Delta \kappa_{\mu \Gamma} T_0}{T_{\mu \Gamma}} x_4 \left(k\right), \qquad (3.44)$$

тоді величина прямої ознаки  $\Delta \kappa_{\rm AT}$  визначається наступним виразом:

$$\Delta \kappa_{\mu \Gamma} = \frac{\Delta x_5 \left(k+1\right) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{\mu \Gamma}}\right) \Delta x_5 \left(k\right)}{x_4 \left(k\right)} \cdot \frac{T_{\mu \Gamma}}{T_0}.$$
(3.45)

Змінна x<sub>5</sub>(k) представляється значенням через вимірювання u<sub>1</sub>(k) датчиком температури холодного потоку повітря завдяки розв'язання відповідного рівняння та функціонального зв'язку вимірювань датчиків температури.

Тоді відповідна змінна аргументу для двозначного предиката може бути подана у такому вигляді

$$\gamma_{35}(k+2) = \left[ \Delta x_{5}(k+2) - \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\mu r}}\right) \Delta x_{5}(k+1) \right] \cdot x_{4}(k) - \left[ \Delta x_{5}(k+1) - \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\mu r}}\right) \Delta x_{5}(k) \right] \cdot x_{4}(k+1),$$
(3.46)

за допомогою якого двозначне предикатне рівняння буде представлене як
$$z_{35} = S\{|\gamma_{35}(k+2)| \le \delta_{35}\}, k = \overline{k_4, k_5}, p,$$
 (3.47)

де  $\delta_{35}$  – допуск на відхилення модуля  $\gamma_{35}(k+2)$ .

Значення аргументу  $z_{35} = 1$  вказує на зміну коефіцієнта передачі  $\Delta \kappa_{\pi}$ . При  $z_{35} = 0$  в даному датчику можливі як  $\Delta T_{\pi}$ , так і  $u_{\pi}$  типи дестабілізації.

Для однозначного встановлення цих типів дестабілізації, як і в попередньому випадку, можна скористатися функціональною діагностичною моделлю для дрейфу нуля u<sub>дг</sub>

$$\Delta x_5 \left(k+1\right) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{\mu \Gamma}}\right) \Delta x_5 \left(k\right) + \left(1 - \frac{T_0}{T_{\mu \Gamma}}\right) u_{\mu \Gamma}.$$
(3.48)

Величина прямої ознаки дестабілізації и<sub>дг</sub> визначається за допомогою виразу

$$\mathbf{u}_{\mathrm{J}\Gamma} = \left[\Delta \mathbf{x}_{5}\left(\mathbf{k}+1\right) - \left(1 - \frac{\mathbf{T}_{0}}{\mathbf{T}_{\mathrm{J}\Gamma}}\right) \Delta \mathbf{x}_{5}\left(\mathbf{k}\right)\right] \cdot \frac{\mathbf{T}_{\mathrm{J}\Gamma}}{\mathbf{T}_{\mathrm{J}\Gamma} - \mathbf{T}_{0}},\tag{3.49}$$

який дозволяє сформувати змінну аргументу для двозначного предикатного рівняння у такому вигляді:

$$\gamma_{36}(k+2) = \Delta x_5(k+2) - \left(2 - \frac{T_0}{T_{\text{A}\text{F}}}\right) \Delta x_5(k+1) + \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{A}\text{F}}}\right) \Delta x_5(k), \quad (3.50)$$

тоді

$$z_{36} = S_2 \left\{ \left| \gamma_{36} \left( k + 2 \right) \right| \le \delta_{36} \right\}, \quad k = \overline{k_4, k_5}, \quad p,$$
 (3.51)

де  $\delta_{36}$  – допуск на відхилення модуля  $\gamma_{36}(k+2)$ .

Значення  $z_{36} = 1$  вказує на дрейф нуля  $u_{dr}$ , а  $z_{36} = 0$  вказує на зміну інерційності  $\Delta T_{dr}$ .

Таким чином, за допомогою описаних логічних ознак можна встановити види дестабілізації ОРУ.

## 3.2.4. Визначення виду дестабілізації

Наступна задачі діагностування полягає визначенні вилів V дестабілізуючих впливів шляхом аналізу оціночних значень прямих ознак. Необхідність розв'язання цієї задачі пов'язана з використанням різних ресурсів для відновлення працездатності ОРУ. Дестабілізуючі впливи можуть бути малої величини, тож їх можна компенсувати різними засобами підстроювання. При високих величинах парирування здійснюється засобами реконфігурації алгоритмів і апаратури. Тому для кожного з вище розглянутих типів дестабілізації розглядатимуться дестабілізуючих впливів: два ВИДИ компенсований та некомпенсований.

Для привода логічна ознака  $z_{11} = 1$  вказує на тип дестабілізації  $\Delta \kappa_{np}$ . Для визначення конкретного виду дестабілізуючого впливу необхідне оціночне значення величини прямої ознаки. У цьому випадку це оцінка поточного значення  $\Delta \kappa_{np}(k)$ , яка обчислюється кожен такт часу за допомогою такого виразу:

$$\Delta \kappa_{\Pi p}\left(k\right) = \frac{\Delta u_{\zeta}\left(k+1\right) - \Delta u_{\zeta}\left(k\right)}{T_{0}u_{y}\left(k\right)}.$$
(3.52)

Оціночне значення зміни коефіцієнта передачі привода  $\Delta \hat{\kappa}_{np}$  можна отримати, використовуючи середньоарифметичне усереднення:

$$\Delta \hat{\kappa}_{\Pi p} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} \Delta \kappa_{\Pi p} (i).$$
(3.53)

Якщо ввести граничне значення  $\Delta \bar{\kappa}_{\Pi pr}$ , що розділяє два види, тоді за допомогою двозначного предикатного рівняння

$$z_{111} = S_2 \left\{ \Delta \overline{\kappa}_{\Pi p_{\Gamma}} < \Delta \hat{\kappa}_{\Pi p} \right\}$$
(3.54)

можна діагностувати конкретний вид дестабілізуючого впливу. Якщо z<sub>111</sub> = 0, то це компенсований вид d<sub>1</sub>. Якщо z<sub>111</sub> = 1, то це некомпенсований вид d<sub>2</sub>.

Для визначення виду дрейфу нуля привода необхідно отримати його оцінне значення, використовуючи результати кожного такту часу

$$\mathbf{u}_{\zeta 0}\left(\mathbf{k}\right) = \Delta \mathbf{u}_{\zeta}\left(\mathbf{k}\right),\tag{3.55}$$

за формулою усереднення

$$\hat{u}_{\zeta 0} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} u_{\zeta 0}(i).$$
 (3.56)

Тоді за допомогою двозначного предикатного рівняння

$$z_{110} = S_2 \left\{ \overline{u}_{\zeta 0} < \hat{u}_{\zeta 0} \right\}$$
(3.57)

визначається конкретний вид дрейфу нуля. Якщо  $z_{110} = 0$ , то це компенсований вид  $d_3$ . Якщо  $z_{110} = 1$ , то це некомпенсований вид  $d_4$ .

Далі будуть розглянуті основні аналітичні співвідношення для діагностування видів дестабілізуючого впливу ВЕ.

Аналітичні співвідношення визначення видів зміни коефіцієнта передачі Δк<sub>ox</sub>:

$$\Delta \kappa_{\rm ox} \left( k \right) = \frac{T_{\rm ox} \Delta x_2 \left( k+1 \right) - \left( T_{\rm ox} - T_0 \right) \Delta x_2 \left( k \right)}{T_0 x_1 \left( k \right)};$$
(3.58)

$$\Delta \hat{\kappa}_{\text{ox}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} \Delta \kappa_{\text{ox}} (i); \qquad (3.59)$$

$$z_{310} = S_2 \left\{ \Delta \bar{\kappa}_{0X\Gamma} < \Delta \hat{\kappa}_{0X} \right\}.$$
(3.60)

Якщо  $z_{310} = 0$ , то це компенсований вид зміни коефіцієнта  $d_5$ . Якщо  $z_{310} = 1$ , то це некомпенсований вид  $d_6$ .

Співвідношення визначення видів зміни сталих часу  $\Delta T_{ox}$  визначені як

$$\Delta T_{ox}(k) = \frac{T_{ox}^{2} \Delta x_{2}(k+1)}{T_{0}[\hat{x}_{2}(k) - \kappa_{ox} x_{1}(k)]};$$
(3.61)

$$\Delta \hat{T}_{ox} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} \Delta T_{ox} (i); \qquad (3.62)$$

$$z_{321} = S_2 \left\{ \Delta \overline{T}_{ox_{\Gamma}} < \Delta \hat{T}_{ox} \right\}.$$
(3.63)

Якщо  $z_{321} = 0$ , то це компенсований вид зміни сталої часу  $d_7$ . Якщо  $z_{321} = 1$ , то це некомпенсований вид  $d_8$ .

Співвідношення визначення видів дрейфу робочої точки  $\theta_{ox}$  можна сформувати наступним чином:

$$\Delta \theta_{\text{ox}}\left(\mathbf{k}\right) = \Delta \mathbf{x}_{2}\left(\mathbf{k}\right); \tag{3.64}$$

$$\Delta \hat{\theta}_{\text{ox}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} \Delta \theta_{\text{ox}} (i); \qquad (3.65)$$

$$z_{320} = S_2 \left\{ \Delta \overline{\theta}_{0X\Gamma} < \Delta \hat{\theta}_{0X} \right\}.$$
(3.66)

Якщо  $z_{320} = 0$ , то це компенсований вид дрейфу робочої точки d<sub>9</sub>. Якщо  $z_{320} = 1$ , то це некомпенсований вид d<sub>10</sub>.

Далі будуть розглянуті основні аналітичні співвідношення для діагностування видів дестабілізуючого впливу датчика температури холодного потоку повітря.

Співвідношення визначення виду зміни коефіцієнта передачі  $\Delta \kappa_{дx}$ :

$$\Delta \kappa_{\mathrm{dx}}(\mathbf{k}) = \frac{\Delta x_3(\mathbf{k}+1) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{\mathrm{dx}}}\right) \Delta x_3(\mathbf{k})}{x_2(\mathbf{k})} \cdot \frac{T_{\mathrm{dx}}}{T_0}; \qquad (3.67)$$

$$\Delta \hat{\kappa}_{\mathrm{dx}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} \Delta \kappa_{\mathrm{dx}} (i); \qquad (3.68)$$

$$z_{331} = S_2 \left\{ \Delta \overline{\kappa}_{\mathcal{I} X \Gamma} < \Delta \hat{\kappa}_{\mathcal{I} X} \right\}.$$
(3.69)

Якщо  $z_{331} = 0$ , то це компенсований вид зміни коефіцієнта  $d_{11}$ . Якщо  $z_{331} = 1$ , то це некомпенсований вид  $d_{12}$ .

Співвідношення визначення виду зміни сталої часу  $\Delta T_{\text{дx}}$ :

$$\Delta T_{\text{gx}}(k) = \frac{\Delta x_{3}(k+1) - \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\text{gx}}}\right) \Delta x_{3}(k)}{\tilde{x}_{3}(k) - \kappa_{\text{gx}} x_{2}(k)} \cdot \frac{T_{\text{gx}}^{2}}{T_{0}}; \qquad (3.70)$$

$$\Delta \hat{T}_{\mathrm{dx}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} \Delta T_{\mathrm{dx}} (i); \qquad (3.71)$$

$$z_{340} = S_2 \left\{ \Delta \overline{T}_{\mathcal{I} X \Gamma} < \Delta \hat{T}_{\mathcal{I} X} \right\}.$$
(3.72)

Якщо  $z_{340} = 0$ , то це компенсований вид зміни сталої часу  $d_{13}$ . Якщо  $z_{340} = 1$ , то це некомпенсований вид  $d_{14}$ .

Співвідношення визначення виду дрейфу нуля идх:

$$u_{\mathrm{dx}}(k) = \left[\Delta x_{3}(k+1) - \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\mathrm{dx}}}\right) \Delta x_{3}(k)\right] \cdot \frac{T_{\mathrm{dx}}}{T_{\mathrm{dx}} - T_{0}}; \qquad (3.73)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_{\mathrm{dx}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} \mathbf{u}_{\mathrm{dx}} \left( i \right); \tag{3.74}$$

$$\mathbf{z}_{341} = \mathbf{S}_2 \left\{ \overline{\mathbf{u}}_{\mathbf{X}\mathbf{\Gamma}} < \hat{\mathbf{u}}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} \right\}. \tag{3.75}$$

Якщо  $z_{341} = 0$ , то це компенсований вид дрейфу нуля  $d_{15}$ . Якщо  $z_{341} = 1$ , то це некомпенсований вид  $d_{16}$ .

Аналогічно визначаються основні аналітичні співвідношення для діагностування датчика температури гарячого потоку повітря.

Співвідношення визначення виду зміни коефіцієнта передачі  $\Delta \kappa_{\rm dr}$ :

$$\Delta \kappa_{\mu\Gamma}(\mathbf{k}) = \frac{\Delta x_5(\mathbf{k}+1) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{\mu\Gamma}}\right) \Delta x_5(\mathbf{k})}{x_4(\mathbf{k})} \cdot \frac{T_{\mu\Gamma}}{T_0}; \qquad (3.76)$$

$$\Delta \hat{\kappa}_{\mathcal{A}\Gamma} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} \Delta \kappa_{\mathcal{A}\Gamma} (i); \qquad (3.77)$$

$$z_{351} = S_2 \left\{ \Delta \overline{\kappa}_{\Pi \Gamma} < \Delta \hat{\kappa}_{\Pi \Gamma} \right\}.$$
(3.78)

Якщо  $z_{351} = 0$ , то це компенсований вид зміни коефіцієнта  $d_{17}$ . Якщо  $z_{351} = 1$ , то це некомпенсований вид  $d_{18}$ .

Співвідношення визначення виду зміни сталої часу  $\Delta T_{ar}$ :

$$\Delta T_{\mu\Gamma}(k) = \frac{\Delta x_5(k+1) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{\mu\Gamma}}\right) \Delta x_5(k)}{\tilde{x}_5(k) - \kappa_{\mu\Gamma} x_4(k)} \cdot \frac{T_{\mu\Gamma}^2}{T_0}; \qquad (3.79)$$

$$\Delta \hat{T}_{\mathcal{A}\Gamma} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} \Delta T_{\mathcal{A}\Gamma} (i); \qquad (3.80)$$

$$z_{360} = S_2 \left\{ \Delta \overline{T}_{\mathcal{A}\Gamma\Gamma} < \Delta \hat{T}_{\mathcal{A}\Gamma} \right\}.$$
(3.81)

Якщо  $z_{360} = 0$ , то це компенсований вид зміни сталої часу  $d_{19}$ . Якщо  $z_{360} = 1$ , то це некомпенсований вид  $d_{20}$ .

Співвідношення визначення виду дрейфу нуля идг:

$$u_{\mathrm{JIF}}(k) = \left[\Delta x_{5}(k+2) - \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\mathrm{JIF}}}\right) \Delta x_{5}(k+1)\right] \cdot \frac{T_{\mathrm{JIF}}}{T_{\mathrm{JIF}} - T_{0}}; \qquad (3.82)$$

$$\hat{u}_{\mathcal{A}\Gamma} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^{m} u_{\mathcal{A}\Gamma} (i); \qquad (3.83)$$

$$z_{361} = S_2 \left\{ \overline{u}_{\mathcal{A}\Gamma\Gamma} < \hat{u}_{\mathcal{A}\Gamma} \right\}.$$
(3.84)

Якщо  $z_{361} = 0$ , то це компенсований вид дрейфу нуля  $d_{21}$ . Якщо  $z_{361} = 1$ , то це некомпенсований вид  $d_{22}$ .

Логічні змінні z<sub>i</sub>, отримані при поетапному вирішенні задачі діагностування з використанням діагностичних моделей, дозволяють сформувати процедуру діагностування непрацездатних станів. ОРУ, викликаних різними дестабілізуючими впливами.

### 3.2.5. Формування дихотомічного дерева діагностування

Алгоритми діагностування дестабілізуючих впливів мають бути систематизовані, забезпечуючи послідовне зняття невизначеності у причинах дестабілізації ОРУ. Узагальнена схема послідовного розв'язання задачі діагностування наведена на рис. 3.5.

Перед початком діагностування здійснюється налаштування модуля діагностики під конкретне значення робочої точки ОРУ. Іншими словами, формуються такі вихідні дані як початкові умови сигналів, що реєструються модулем діагностики, u(kT<sub>0</sub>), u<sub>дx</sub>(kT<sub>0</sub>), u<sub>дr</sub>(kT<sub>0</sub>) і u<sub>ζ</sub>(kT<sub>0</sub>), допуски на відхилення аргументів для двозначних предикатних рівнянь б<sub>і</sub>, інтервали для обробки предикатних рівнянь [k<sub>i</sub>; k<sub>j</sub>].



Рис. 3.5. Узагальнена схема послідовного зняття невизначеності

З вихідних даних і діагностичних моделей модуль діагностики послідовно надає висновок про значення предикатних рівнянь. Так, рис. 3.5 вказує на те, що аналіз предикатних рівнянь, пов'язаних із задачею пошуку місця дестабілізації, буде здійснюватися лише у разі реєстрації непрацездатного стану ОРУ. Аналогічним чином проводиться активація предикатних рівнянь, що визначаються тип і вид дестабілізації: задача встановлення типу вирішується лише після однозначного визначення функціонального елемента ОРУ, схильного до дестабілізації, і, відповідно, задача визначення конкретного виду вирішується після встановлення типу дестабілізуючого впливу.

Подані на узагальненій схемі (рис. 3.5) рівні, що визначають глибину діагностування, можуть містити в собі нескінченну кількість предикатних рівнянь. Розширення її структури проводиться за рахунок досвіду роботи з діагностичними моделями та особливостями ОРУ, реєстрації нових та уточнення відомих дестабілізацій, змін у математичних моделях ОАУ, реалізацій нових способів відновлення працездатності. Отже, доцільно позначати невизначений дестабілізуючий вплив, що, тим самим, дозволить зберегти систематизовану структуру алгоритму діагностування.

Як було представлено вище, предикатні рівняння z<sub>i</sub> надають рішення у формі логічних змінних, що є ознаками діагностування функціонального стану ОРУ. Тоді, використовуючи логічний зв'язок між цими ознаками, послідовне зняття невизначеності можна подати за допомогою дихотомічних гілок. Об'єднання гілок, згідно з описом рис. 3.5, формує дихотомічне дерево так, що в його вузлах розміщуються предикатні рівняння, а гілки, що позначені результатами вирішення цих двозначних предикатних рівнянь («0» або «1»), визначають напрямок подальшого проходження гілками до наступного вузла дихотомічного дерева.

Таким чином, дихотомічне дерево діагностування працездатності ОРУ, що представлено на рис. 3.6, буде відповідати узагальненій структурі діагностування (рис. 3.5), наділеній описаними атрибутами діагностичних моделей [81].

Використовуючи структуру рис. 3.6 можна проаналізувати процес роботи модуля діагностики для конкретного випадку. Наприклад, нехай в ОРУ відбулася дестабілізація, спричинена зміною сталої часу ВЕ на величину ΔT<sub>ox</sub>, що не перевищує граничне значення, іншими словами, виникла дестабілізація виду d<sub>7</sub>.

Процедура виявлення за допомогою предикатного рівняння (3.8) сформує значення  $z_0 = 1$ , що вказує на непрацездатність ОРУ. Далі за допомогою предикатного рівняння (3.12) буде встановлено, що привод працездатний, оскільки  $z_1 = 0$ , а непрацездатність ОРУ викликана відхиленням параметра іншого функціонального елемента ОРУ. Так, рішеннями предикатних рівнянь (3.13) і (3.14) будуть  $z_2 = 1$  і  $z_3 = 1$ , які вказують на непрацездатність ВЕ. Далі з трьох можливих типів дестабілізації за допомогою розв'язання предикатних рівнянь (3.25), (3.30) і (3.63) послідовно визначаються  $z_{31} = 1$ ,  $z_{32} = 1$  і  $z_{321} = 0$ відповідно. Отже, однозначно визначається компенсований вид зміни сталої часу  $\Delta T_{ox} - d_7$ .



Рис. 3.6. Дихотомічне дерево діагностування ОРУ

Аналогічним чином можна проаналізувати логічні зв'язки ознак, що беруть участь у формуванні діагнозу ОРУ при появі у його функціонуванні кожного з 22 відомих видів дестабілізуючих впливів, а також виявлення невідомих видів.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено функціональну та структурну схеми раціональної системи управління ВЕ. Отримано математичні моделі лінійного наближення ОРУ у дискретному просторі станів, які дозволяють перейти до формування

діагностичних моделей, що відображають вплив дестабілізацій на доступні вимірюванню сигнали.

2. Розроблено лінійні діагностичні моделі раціональної системи управління ВЕ як ОАУ. Розроблені моделі дозволяють сформувати аналітичний зв'язок прямих та непрямих ознак дестабілізуючих впливів, що дає можливість аналітично формувати алгоритми виявлення, пошуку місця, встановлення типу та визначення виду дестабілізуючих впливів.

3. Розглянуто особливості методу діагностування ОРУ з використанням функціональних діагностичних моделей та дихотомічних дерев.

4. Отримані алгоритми діагностування дозволяють виявити факт появи дестабілізації в ОРУ, знайти дестабілізований функціональний елемент, встановити тип дестабілізації та визначити його конкретний вид.

5. Отримані алгоритми діагностування ОРУ відрізняються від відомих використанням конкретних функціональних діагностичних моделей функціональних елементів ОРУ, що дозволило спростити структуру алгоритмічного забезпечення процесу раціонального управління.

Розроблено послідовного невизначеності 6. структуру ЗНЯТТЯ ОРУ дестабілізуючого впливу дихотомічного на У вигляді дерева діагностування. Розроблене послідовне вирішення задачі діагностування дозволяє однозначно визначати види дестабілізуючих впливів, що знаходяться у базі дихотомічного дерева.

## РОЗДІЛ 4

# ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОБ'ЄКТА РАЦІОНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ

4.1. Особливості відновлення працездатності об'єкта раціонального управління

Після отримання повного діагнозу про працездатності ОРУ потрібно перейти до наступної задачі парирування дестабілізуючих впливів d<sub>i</sub> є D та відновленням працездатності функціональних елементів ОРУ на кінцевому інтервалі часу, що не перевищує час перехідного процесу.

Завдання відновлення працездатності ОРУ полягає в тому, щоб повернути його в стан, при якому він здатний виконувати поставлені вимоги.

Для реагування на позаштатні ситуації, замкнуті САУ, що використовують принцип управління за відхиленням, доповнюються резервними елементами та засобами реконфігурації. Ці заходи дозволяють вимикати несправні елементи та підключати резервні для забезпечення стабільної роботи. Зазвичай, виявлення несправності відбувається шляхом контролю параметрів. Якщо параметри виходять за межі, несправний елемент вимикається, а резервний підключається замість нього. Однак, такий контроль не завжди дозволяє виявити причини несправності елемента. Це означає, що відновлення працездатності часто потребує повної заміни елемента, що може бути дорогим і неефективним.

Моделі відновлення реалізуються у модулі управління (рис. 3.1). Формування алгоритмів відновлення проводиться за допомогою методу компенсації, що базується на використанні функціональних діагностичних моделей, резервних засобів та алгоритмів з метою відновлення працездатності ОРУ. Алгоритми відновлення залежать як від типу функціонального елемента ОРУ, так і від видів його дестабілізуючих впливів, і навіть засобів відновлення працездатності. Для відновлення працездатності ОРУ використовуються такі засоби відновлення [77]:

- 1) сигнальне підстроювання;
- 2) реконфігурація алгоритмів;
- 3) реконфігурація апаратури;
- 4) використання еталонних моделей;
- 5) коригування вимірювань.

Схематично вирішення задачі відновлення працездатності ОРУ можна подати у вигляді рис. 4.1.



Рис. 4.1. Узагальнена схема вирішення задачі відновлення працездатності ОРУ

Відновлення працездатності ОРУ базується на таких положеннях [82]:

1) ОРУ у початковий момент часу вважається працездатним;

2) відновлення працездатності ОРУ здійснюється за результатами діагнозу, завдяки інформації про конкретний функціональний елемент, в якому відбулася дестабілізація, а також про конкретний тип та вид дестабілізуючого впливу. Тому відновлення працездатності ОРУ здійснюється за допомогою відновлення працездатності саме функціонального елемента, а не усього ОРУ;

3) кожному відомому виду дестабілізації зіставляється такий засіб відновлення, що забезпечує стійкість та якість процесу переведення ОРУ з непрацездатного стану до працездатного;

4) дестабілізуючий вплив має разовий характер;

5) час відновлення не перевищує час перехідного процесу.

Для оцінки якості відновлення працездатності ОРУ вводяться наступні показники якості раціональної системи управління ВЕ:

 час відновлення (Δt<sub>B</sub>) – час, необхідний для вибору підходящого засобу відновлення, формування регулюючого сигналу та парирування визначено виду дестабілізації;

 похибка відновлення (δ<sub>B</sub>) – параметр, що характеризує точність, з якою вдається парирувати визначений вид дестабілізації; відхилення при встановлених режимах еталонної моделі ОАУ та моделі відновленого ОРУ;

3) вичерпність – якісний показник, що характеризує здатність доступних ресурсів, що залишилися, парирувати нові дестабілізуючі впливи.

Час відновлення (Δt<sub>B</sub>) відраховується від моменту, коли вид дестабілізуючого впливу визначено модулем діагностики, тобто відновлення починається відразу після закінчення діагностування (Δt<sub>д</sub>). Завершення відновлення безпосередньо залежить від обраної точності діагностування δ<sub>B</sub>.

При виборі точності δ<sub>B</sub> враховуються такі параметри як інструментальна похибка δ<sub>u</sub>, похибка лінеаризації δ<sub>л</sub> та допустимі похибки, пов'язані з наявністю перешкод та шумів δ<sub>л</sub>:

$$\delta_{\rm B} = f\left(\delta_{\rm H}, \ \delta_{\rm \pi}, \ \delta_{\rm \pi}\right). \tag{4.1}$$

124

Також потрібно взяти до уваги недосконалість математичної моделі, тобто ОРУ за замовчуванням відрізняється від реального ОАУ. Цей факт може бути причиною невизначеності у вирішенні завдання відновлення, що характеризується взаємозв'язком між допуском на відхилення  $\delta_0$  та похибкою відновлення  $\delta_B$ . Цей взаємозв'язок можна подати у вигляді гістерезису, тоді для усунення цієї невизначеності доцільно ввести величину додаткового допуску  $\Delta$ , яка буде характеризувати довіру до виконання задачі відновлення:

$$\delta_{\rm B} = \delta_0 - \Delta. \tag{4.2}$$

У якості рішення пропонується використання характеристики гістерезисного реле (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Графічна інтерпретація вирішення невизначеності на основі характеристики гістерезисного реле

Внаслідок дестабілізації відбувається порушення працездатності ОРУ, що проявляється у збільшенні відхилення значень вихідних сигналів ОРУ та ОАУ.

По перевищенню допуску  $\delta_0$  розпочинається процес діагностування. Ця частина характеристики позначена напрямком стрілок вправо-вгору. При відновленні працездатності величина відхилення вихідних значень ОРУ та ОАУ зменшується, лише після досягнення значення  $\delta_B$  ПРУ вважатиме ОРУ працездатним. Ця частина характеристики позначена напрямом стрілок влівовниз.

Ця нелінійність застосовується у роботі термостата в холодильнику. Коли температура всередині холодильника піднімається вище за верхній поріг (наприклад, 4 °C), термостат включає компресор для охолодження; температура повинна опуститись нижче нижнього порогу (наприклад, 2 °C), щоб термостат вимкнув компресор. Таким чином, гістерезис дозволяє уникнути надмірних перемикань реле при невеликих флуктуаціях вхідного сигналу, що забезпечує стабільність роботи і запобігає мерехтіння контактів реле поблизу порогових значень.

Стосовно задачі відновлення працездатності ОРУ, гістерезисний підхід запобігає повторному діагностуванню дестабілізуючого впливу, який був умовно відновлений.

Таким чином, зі збільшенням додаткового допуску  $\Delta$  знижується похибка відновлення ( $\delta_B$ ) і збільшується час відновлення ( $t_B$ ).

На час відновлення працездатності ОРУ суттєво впливає використання резервних функціональних елементів – використання резервного варіанта функціонального елемента. Якщо один елемент виходить з ладу, можна миттєво переключитися на резервний варіант замість того, щоб формувати додатковий регулюючий сигнал для парирування дестабілізацій (як це може бути реалізовано при використанні принципу управління за відхиленням). Однак такий варіант є короткочасним рішенням, оскільки резервний елемент також може бути підданий аналогічному дестабілізуючого впливу, а використання декількох резервних варіантів є надмірно витратним і нераціональним рішенням. Проте такий спосіб можна застосовувати в крайніх випадках і критичних ситуаціях, наприклад, коли інші ресурси вже вичерпані або потрібно відновити працездатність за мінімальний час.

Вичерпність ресурсів є параметром, що визначає відновлюваність ОРУ, – властивість, яка дозволяє за допомогою наявних засобів відновити працездатність ОРУ за кінцевий час. Інакше кажучи, це область покриття засобами відновлення можливих дестабілізуючих впливів.

На рис. 4.3 проілюстровано вичерпність ресурсів для відновлення працездатності ОРУ при заданому наборі дестабілізуючих впливів.



a)







Рис. 4.3. Графічна інтерпретація вичерпності ресурсів відновлення працездатності ОРУ: a – при використанні мінімального набору ресурсів; б – при збільшеній кількості ресурсів;

в – при зменшеній кількості ресурсів

Насамперед ПРУ повинен мати у своєму складі хоча б один засіб, який здатний парирувати хоча б один дестабілізуючий вплив, для якого розроблено діагностичні моделі та яке є у дихотомічному дереві діагностування (рис. 4.3, а). Такий мінімальний набір необхідних ресурсів визначає нижню межу вичерпності. Якщо існує дестабілізуючий вплив, який не може бути відпрацьований, то ОРУ вважається невідновлюваним.

Підвищити показник вичерпності можна за рахунок збільшення кількості ресурсів. Якщо конкретний вид дестабілізації d<sub>i</sub> можна парирувати кількома способами, тоді встановлюється певна надмірність – і у разі повторного діагностування того ж виду d<sub>i</sub> ПРУ буде здатний відновити працездатність за допомогою ще одного підходящого засобу. Так, рис. 4.3, б ілюструє багатоваріантність парирування дестабілізації d<sub>21</sub>: якщо основний засіб відновлення ЗВ5 вже буде задіяний для парирування цього виду, то ЗВ6 можна буде використовувати у разі повторного виникнення d<sub>21</sub>. Недоліком такого

підходу є додаткові витрати на обладнання, електроенергію, обслуговування та інші операційні витрати, ускладнення проектування, налаштування та управління.

Другий спосіб полягає у підвищенні якості ресурсів відновлення. Якщо у складі ОРУ є однотипні функціональні елементи (наприклад, датчики температури), то доцільно розробити такий алгоритм, який буде здатний неодноразово відновлювати їхню працездатність, тобто парирувати кілька схожих видів дестабілізації d<sub>i</sub> и d<sub>i</sub>. Так, рис. 4.3, в ілюструє багатозадачність засобів відновлення 3В4 і 3В5: оскільки види дестабілізації d<sub>15</sub> і d<sub>21</sub> впливають на однотипні параметри датчиків температури, згідно рис. 3.6, алгоритм відновлення буде однаковим (с урахуванням різних значень параметрів і контуру регулювання). Якщо ЗВ4 вже буде задіяно для парирування d<sub>21</sub>, то ЗВ5 можна буде використати у разі повторного виникнення d<sub>21</sub>; аналогічно для d<sub>15</sub>. Подібним чином можна розробляти алгоритми, які будуть спеціалізуватися на відновленні працездатності конкретного функціонального елемента, іншими словами, розробляти засіб відновлення для певної гілки дихотомічного дерева діагностування. До недоліків можна віднести складність проектування та управління, а також ускладнення архітектури програмної частини.

Надмірність засобів відновлення працездатності ОРУ так чи інакше впливає на якість та ефективність процесу відновлення. Залежно від того, як вона реалізована і налаштована, це може мати як позитивні, і негативні наслідки.

Позитивні аспекти надмірності засобів відновлення:

1. Підвищення надійності: надмірність може підвищити надійність відновлення, оскільки наявність додаткових ресурсів та резервних каналів може зменшити ймовірність збоїв під час відновлення.

2. Зниження часу простою: за допомогою надлишкових засобів можна прискорити процес відновлення, оскільки при вже використаному чи зарезервованому алгоритмі можна миттєво переключитися на інший альтернативний варіант.

3. Стійкість в екстремальних ситуаціях: у разі екстремальних ситуацій надмірність може забезпечити стійкість та контрольованість процесу управління. Наприклад, багато літаків мають два чи більше двигунів, що дозволяє продовжувати політ навіть при відмові одного з них.

4. Рівень покриття: більший набір відновлювальних ресурсів здатний парирувати більшу кількість дестабілізацій. Так, деякі ресурси можуть бути використані для парирування нових видів дестабілізуючих впливів.

Негативні аспекти надмірності засобів відновлення:

1. Збільшення вартості та складності: реалізація та підтримка надлишкових засобів потребує додаткових фінансових та часових витрат, оскільки необхідно купувати та налаштовувати додаткове обладнання та програмне забезпечення.

2. Складність управління: управління надлишковими засобами може вимагати додаткових навичок та ресурсів, оскільки необхідно стежити за станом всіх компонентів та засобів відновлення та їх поєднанням із функціональними елементами ОРУ.

3. Втрати продуктивності: у деяких випадках використання надлишкових засобів може призвести до втрати продуктивності, оскільки ресурси можуть бути розподілені між кількома компонентами, навіть коли вони перебувають у робочому стані.

4. Ризик невідповідності: якщо надлишкові засоби не налаштовані або не керуються належним чином, вони можуть стати джерелом конфліктів та невідповідностей, що може погіршити ситуацію замість її покращення.

Отже, ефективність надмірності засобів відновлення залежить від правильного балансу між надійністю та ресурсами, а також від правильної реалізації та налаштування. Важливо ретельно планувати та оцінювати потреби ОРУ та обирати найбільш підходящий засіб відновлення для конкретного виду дестабілізуючого впливу. У роботі розглянуто особливості відновлення працездатності привода, ВЕ та датчиків температури на прикладі функціональної схеми раціональної системи управління (рис. 3.1), що опубліковані у роботі [81].

4.2. Відновлення працездатності функціональних елементів об'єкта раціонального управління

# 4.2.1. Відновлення працездатності привода

Згідно рис. 3.6, в приводі діагностуються чотири види дестабілізуючих впливів  $d_1 \div d_4$ .

Компенсований вид d<sub>1</sub> зміни коефіцієнта передачі  $\Delta \kappa_{np}$  може бути парирований за допомогою сигнального підстроювання. Величина цього підстроювання визначається з рівняння функціональної діагностичної моделі:

$$\Delta \mathbf{x}_{1}(\mathbf{k}+1) = \Delta \mathbf{x}_{1}(\mathbf{k}) + \Delta \kappa_{\mathbf{np}} \mathbf{T}_{0} \mathbf{u}_{\mathbf{y}}(\mathbf{k}).$$
(4.3)

Потрібно сформувати такий додатковий сигнал управління на вхід привода, щоб компенсувати відхилення, викликане  $\Delta \kappa_{np} T_0 u_y(k)$ . Для цього необхідно використати наступне рівняння:

$$\tilde{\kappa}_{\Pi p} T_0 \left[ u_y(k) + u_y'(k+1) \right] = \kappa_{\Pi p} T_0 u_y(k), \qquad (4.4)$$

де  $u_{y}'(k+1)$  – сигнал підстроювання.

Рішення цього рівняння щодо сигналу підстроювання має вигляд

$$u_{y}'(k+1) = \frac{\left(\kappa_{\Pi p} - \tilde{\kappa}_{\Pi p}\right)}{\tilde{\kappa}_{\Pi p}} \cdot u_{y}(k) = \frac{\Delta \kappa_{\Pi p}}{\kappa_{\Pi p} - \Delta \kappa_{\Pi p}} \cdot u_{y}(k).$$
(4.5)

Для реалізації сигнального підстроювання необхідно використовувати величину оцінки відхилення коефіцієнта передачі привода  $\Delta \hat{k}_{np}$ , визначається за (3.53), тоді за допомогою рівняння

$$\mathbf{u}_{\mathbf{y}}'(\mathbf{k}+1) = \frac{\Delta \hat{\mathbf{k}}_{\Pi \mathbf{p}}}{\mathbf{\kappa}_{\Pi \mathbf{p}} - \Delta \hat{\mathbf{k}}_{\Pi \mathbf{p}}} \cdot \mathbf{u}_{\mathbf{y}}(\mathbf{k})$$
(4.6)

можна забезпечити компенсацію відхилення та відновити працездатність привода.

При компенсованому вигляді дестабілізуючого впливу d<sub>3</sub>, пов'язаного з появою дрейфу нуля привода, для відновлення працездатності також використовується сигнальна підстроювання. Величина сигнального підстроювання визначається рівняння збуреного руху привода:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{1}\left(\mathbf{k}+1\right) = \tilde{\mathbf{x}}_{1}\left(\mathbf{k}\right) + \kappa_{\mathbf{n}\mathbf{p}}\mathbf{T}_{0}\mathbf{u}_{\mathbf{y}}\left(\mathbf{k}\right) + \mathbf{T}_{0}\mathbf{u}_{\zeta0}.$$
(4.7)

Виходячи з умови компенсації дрейфу нуля, можна сформувати таку рівність:

$$\kappa_{\Pi p} T_0 \left[ u_y(k) + u_y'(k+1) \right] + T_0 u_{\zeta 0} = \kappa_{\Pi p} T_0 \Delta u_y(k+1) + T_0 u_{\zeta 0} = \kappa_{\Pi p} T_0 u_y(k), \quad (4.8)$$

з якого сигнал підстроювання визначається як

$$u_{y}'(k+1) = -\frac{\hat{u}_{\zeta 0}}{\kappa_{np}},$$
 (4.9)

де  $\hat{u}_{\zeta 0}$  – оціночна величина дрейфу нуля, яка визначається за (3.56).

Функціональну схему сигнального підстроювання привода при d<sub>1</sub> і d<sub>3</sub>, де  $\{d_1; d_3\} \in \hat{D}_n$ , можна представить на рис. 4.4.



Рис. 4.4. Функціональна схема сигнального підстроювання при  $d_1$  і  $d_3$ 

Оскільки привод як функціональний елемент складається з КД і регулюючого вентиля, то при появі некомпенсованих видів d<sub>2</sub> і d<sub>4</sub> для відновлення працездатності розглянуто використання резервного КД. У момент отримання повного діагнозу з модуля діагностики  $\{d_2; d_4\} \in \hat{D}_m$  у модулі управління формується команда  $u_{\kappa}(k+1)$  на комутатори для ізолювання несправного КД, і потім сигнал управління змінюється з  $u_1(k)$  на  $u_2(k)$  для інтеграції в систему резервного КД. Так, у якості сигналу переміщення регулюючого вентиля  $\zeta(t)$  буде використаний вихідний сигнал резервного КД  $\zeta'(t)$  замість номінального  $\zeta(t)$ .

Функціональна схема реконфігурації представлена на рис. 4.5.



Рис. 4.5. Функціональна схема реконфігурації привода при d<sub>2</sub> і d<sub>4</sub>

Таким чином, у разі виникнення дестабілізацій видів d<sub>1</sub> або d<sub>3</sub> використовується оціночний різницевий сигнал  $u_y'(k+1)$  (4.6) і (4.9) для компенсації дестабілізуючого впливу. У разі діагностування некомпенсованих видів d<sub>2</sub> або d<sub>4</sub> за допомогою додаткового сигналу управління  $u_{\kappa}(k+1)$ здійснюється ізоляція несправного КД та вводиться резервний варіант, що забезпечує відновлення працездатності ОРУ.

# 4.2.2. Відновлення працездатності вихрового енергороздільника

Порушення працездатності ВЕ обумовлено шістьма видами дестабілізуючих впливів d<sub>5</sub> ÷ d<sub>10</sub>.

Функціональна діагностична модель для типу дестабілізації d<sub>5</sub>, викликаної зміною коефіцієнта передачі Δк<sub>ох</sub>, описується наступним рівнянням:

$$\Delta x_{2}(k+1) = \frac{T_{0}}{T_{ox}} \Delta \kappa_{ox} x_{1}(k) + \frac{T_{ox} - T_{0}}{T_{ox}} \Delta x_{2}(k).$$
(4.10)

Для компенсації першої компоненти правої частини рівняння необхідно сформувати такий додатковий сигнал управління  $u_y'$ , щоб з'явився третій доданок виду

$$-\frac{T_0 \Delta \hat{\kappa}_{ox}}{T_{ox}} x_1 (k+1),$$

що дозволяє компенсувати перший доданок рівняння (4.10).

Якщо сформувати додатковий керуючий сигнал такого виду

$$u_{y}'(k+2) = \frac{\Delta \hat{\kappa}_{ox}}{T_{ox} \kappa_{\Pi p}} \Big[ x_1(k+1) - x_1(k) \Big], \qquad (4.11)$$

тоді компенсація зміни коефіцієнта передачі ВЕ здійснюватиметься за допомогою переходу в іншу робочу точку.

Компенсацію виду d7 дестабілізуючого впливу, пов'язаного із зміною інерційності ВЕ на величину  $\Delta T_{ox}$ , можна провести з використанням функціональної діагностичної моделі

$$\Delta x_{2}(k+1) = \frac{T_{0}\Delta T_{ox}}{T_{ox}^{2}} \Delta x_{2}(k) + \frac{\kappa_{ox}T_{0}\Delta T_{ox}}{T_{ox}^{2}} x_{1}(k), \qquad (4.12)$$

що дозволяє сформувати алгоритм виду

$$\hat{x}_{1}(k+2) = \frac{T_{ox}^{2}}{\kappa_{ox}T_{0}\Delta\hat{T}_{ox}} \left[ \frac{T_{0}\Delta\hat{T}_{ox}}{T_{ox}^{2}} \Delta x_{2}(k) - \Delta x_{2}(k+1) \right].$$
(4.13)

Для практичної реалізації цього алгоритму необхідно використовувати доступний вимірюванню сигнал  $x_3(k)$  (рис. 3.3), застосовуючи рівняння зв'язку з недоступному вимірюванню сигналу  $x_2(k)$  – і тоді додатковий сигнал обчислюватиметься через відхилення  $\Delta x_3(k)$ .

Цей новий сигнал управління формується за допомогою наступного рівняння:

$$u_{y}'(k+4) = \frac{\hat{x}_{1}(k+3) - \hat{x}_{1}(k+2)}{\kappa_{\pi p}T_{0}}, \qquad (4.14)$$

яке забезпечує форсоване управління ВЕ з метою компенсації зміни сталої часу.

Компенсація дрейфу робочої точки, вид d<sub>9</sub>, може бути здійснена за допомогою сигнального підстроювання. Виходячи з рівняння функціональної діагностичної моделі (3.26), для компенсації робочої точки на величину  $\hat{\theta}_{ox0}$  потрібно змінити сигнал x<sub>2</sub>(k) на вході ВЕ на цю величину. Тоді, скориставшись структурою рівняння (4.9), можна визначити, що додатковий сигнал матиме вигляд

$$u_{y}'(k) = -\frac{\hat{\theta}_{ox0}}{\kappa_{\Pi p} \kappa_{ox}}.$$
(4.15)

Такий додатковий сигнал управління дозволить компенсувати зміну положення робочої точки ВЕ, спричинене видом дестабілізації. d<sub>9</sub>.

Функціональну схему відновлення працездатності ВЕ при d<sub>5</sub>, d<sub>7</sub> і d<sub>9</sub>, де  $\{d_5; d_7; d_9\} \in \hat{D}_k$ , можна представити на рис. 4.6.



Рис. 4.6. Функціональна схема відновлення працездатності ВЕ при d5, d7 і d9

Некомпенсовані види дестабілізуючих впливів  $d_6$ ,  $d_8$  і  $d_{10}$  не можуть бути парирувані інструментальними засобами так, щоб відновити повну працездатність ВЕ. Тому якщо умови експлуатації дозволяють використовувати різні режими роботи ВЕ в заданому діапазоні вихідних сигналів, то завдяки аналізу статичних характеристик (рис. 2.14, 2.15) можна визначити переходи між режимами роботи [25].

Перехід з одного робочого режиму в інший може здійснюватися шляхом переміщення регулюючого вентиля в положення  $\zeta$ , при якому вихідна температура відповідатиме необхідному значенню. Особливістю є сталість тиску вхідного повітря Р. Цей перехід можливий для каналу холодного потоку повітря завдяки параболічній формі статичних характеристик (рис. 4.7, а). Так, перехід 1, що представлено на рис. 4.7 (а, б), дозволяє змінити значення параметрів ВЕ, використовувати атрибути відповідної математичної моделі.

Перевагою цього способу є простота реалізації, оскільки вона не вимагає використання додаткових сигналів управління, додаткове переміщення здійснюється за рахунок сигналу управління приводом u<sub>y</sub>' (k+1).

Недоліком цього способу для розглянутого варіанта ВЕ є неможливість відновлення працездатності ВЕ для каналу гарячого потоку повітря через особливості статичних характеристик (рис. 4.7, б). Іншими словами, якщо робота



системи управління полягає у стабілізації температури гарячого потоку повітря, тоді доцільно застосовувати інший спосіб відновлення працездатності ВЕ.

a)



Рис. 4.7. Графічне позначення переходу з одного режиму роботи до іншого для каналів холодного (а) і гарячого (б) потоків повітря

Другий спосіб являє собою двоетапне підстроювання, представлене у вигляді переходів 2.1 і 2.2 на рис. 4.7. Особливістю цього способу є встановлення нового значення тиску Р за допомогою додаткового сигналу  $u_{\kappa}(k+1)$ , внаслідок чого ВЕ переходить в інший режим роботи. І далі алгоритм управління працює у діапазоні нового режиму роботи за рахунок  $\Delta \zeta$  аналогічно описаному вище способі з метою відпрацювати різницю, що утворилася в температурі вихідних потоків повітря  $\Delta T_{x}$  і  $\Delta T_{\Gamma}$ . Цей спосіб дозволяє обробляти канали як холодного, так і гарячого потоків повітря в обмеженому діапазоні роботи, проте недоліком є значне ускладнення структури ПРУ та алгоритмів управління.

Описані способи параметричного підстроювання для d<sub>6</sub>, d<sub>8</sub> і d<sub>10</sub>, де  $\{d_6; d_8; d_{10}\} \in \hat{D}_r$ , можна представити у вигляді функціональної схеми на рис. 4.8.



Рис. 4.8. Функціональна схема парирування d<sub>6</sub>, d<sub>8</sub> і d<sub>10</sub> за рахунок зміни номінального режиму роботи ВЕ

Таким чином, у разі виникнення дестабілізацій видів d<sub>5</sub>, d<sub>7</sub> або d<sub>9</sub> використовується оціночний різницевий сигнал  $u_{y'}(k+1)$  (4.11), (4.14), (4.15) для компенсації дестабілізуючого впливу. Для відновлення працездатності ВЕ при некомпенсованих дестабілізуючих впливах d<sub>6</sub>, d<sub>8</sub> і d<sub>10</sub> здійснюється зміна математичної моделі використовуваного в системі ВЕ з можливим варіюванням значення тиску вхідного потоку повітря P<sub>ст</sub>. 4.2.3. Відновлення працездатності датчиків температури

Згідно рис. 3.6, порушення працездатності датчика температури холодного потоку повітря відбувається через шість видів дестабілізуючих впливів d<sub>11</sub> ÷ d<sub>16</sub>, і d<sub>17</sub> ÷ d<sub>22</sub> – для датчика температури гарячого потоку повітря.

Для відновлення вимірювань непрацездатного датчика температури можна використовувати низку засобів:

– сигнальне підстроювання відхилень параметрів датчиків температури;

 реконфігурацію апаратури за рахунок використання додаткових датчиків температури;

 вимірювання датчика температури гарячого потоку повітря можуть бути використані для відновлення вимірювань непрацездатного датчика температури холодного потоку повітря у разі виникнення некомпенсованого виду дестабілізації;

– за допомогою використання еталонної моделі, що дозволяє отримувати дискретні значення непрацездатного датчика.

Компенсовані види  $\{d_{11}; d_{17}\} \in \hat{D}_d$ , що призводять до зміни коефіцієнтів передачі  $\Delta \kappa_{\pi x}$  і  $\Delta \kappa_{\pi r}$  відповідно можуть бути парирувані за допомогою сигнальної компенсації. Додатковий сигнал управління  $u_y'$  не подається на входи функціональних елементів, а є складовою дискретної форми для підстроювання вихідних сигналів датчиків температури.

За аналогією з відновленням працездатності привода величину оцінок відхилення коефіцієнтів передачі датчика температури холодного потоку повітря  $\Delta \hat{\kappa}_{dx}$  і датчика температури гарячого потоку повітря  $\Delta \hat{\kappa}_{dr}$ , що визначаються за (3.68) і (3.77) відповідно, доцільно використовувати для реалізації сигнального підстроювання:

$$\begin{cases} u_{y}'(k+1) = \frac{\Delta \hat{\kappa}_{\pi X}}{\kappa_{\pi X} - \Delta \hat{\kappa}_{\pi X}}; \\ u_{y}'(k+1) = \frac{\Delta \hat{\kappa}_{\pi \Gamma}}{\kappa_{\pi \Gamma} - \Delta \hat{\kappa}_{\pi \Gamma}}. \end{cases}$$
(4.16)

Компенсація дрейфу нуля датчиків температури холодного  $d_{15} \in \hat{D}_d$  і гарячого  $d_{21} \in \hat{D}_d$  потоків повітря також може бути здійснена за допомогою сигнального підстроювання. Виходячи з рівнянь функціональної діагностичної моделі (3.39) та (3.48), для компенсації дестабілізації на величини  $\hat{u}_{dx0}$  і  $\hat{u}_{dr0}$  відповідно потрібен додатковий сигнал на виході несправного датчика температури:

$$\begin{cases} u_{y}'(k+1) = -\hat{u}_{dx0}; \\ u_{y}'(k+1) = -\hat{u}_{dr0}. \end{cases}$$
(4.17)

Функціональна схема сигнального підстроювання при компенсованих видах дестабілізуючих впливів представлена на рис. 4.9.



Рис. 4.9. Функціональна схема сигнальної компенсації d11, d15, d17 і d21

Зважаючи на малу інерційність датчиків температур,  $\Delta T_{ax}$  і  $\Delta T_{ar}$ відповідно, компенсації виду  $\{d_{13}; d_{19}\} \in \hat{D}_p$  не доцільно парирувати за допомогою сигнального підстроювання. Для даних випадків процес відновлення вимірювань датчика температури непрацездатного температури холодного потоку повітря пропонується здійснювати за допомогою вимірювань датчика температури гарячого потоку повітря. Особливість реконфігурації алгоритмів у тому, щоб оперативно і ефективно підключити заздалегідь розроблений алгоритм, який би змінив один датчик температури іншим датчиком температури. Активація цього алгоритму здійснюється за рахунок додаткового управляючого сигналу  $u_{\kappa}(k+1)$ . Цей спосіб представлений у вигляді функціональних схем, наведених на рис. 4.10 та рис. 4.11.

Вимірювання датчиків пов'язані між собою залежністю

$$x_3(k) = x_5(k) - \theta(\zeta),$$
 (4.18)

де θ(ζ) – величина відмінності показань температури залежно від переміщення вентиля ζ (рис. 2.14, 2.15).



Рис. 4.10. Функціональна схема реконфігурації управління датчиками температури для дестабілізації d<sub>13</sub>



Рис. 4.11. Функціональна схема реконфігурації управління датчиками температури для дестабілізації d<sub>19</sub>

Тому при всіх можливих видах дестабілізуючих впливів замість неправильних вимірювань датчика температури холодного потоку повітря можна користуватися оціночними вимірюваннями:

$$\hat{\mathbf{x}}_{3}(\mathbf{k}) = \mathbf{x}_{5}(\mathbf{k}) - \theta(\mathbf{x}_{1}(\mathbf{k})).$$
 (4.19)

Вимірювання непрацездатного датчика температури холодного потоку повітря можуть бути замінені оціночними вимірюваннями, що отримуються за допомогою еталонної моделі:

$$\begin{cases} \hat{x}_{2}(k+1) = \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{0x}}\right) \hat{x}_{2}(k) + \frac{\kappa_{0x}T_{0}}{T_{0x}} \cdot \frac{u_{\zeta}(k)}{\kappa_{\pi p}}; \\ \hat{x}_{3}(k+1) = \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{0r}}\right) \hat{x}_{3}(k) + \frac{\kappa_{0r}T_{0}}{T_{0r}} \cdot \hat{x}_{2}(k). \end{cases}$$
(4.20)

Змінна  $\hat{x}_3(k)$  являє собою оціночне вимірювання датчика температури холодного потоку повітря, що відповідає номінальному режиму функціонування ВЕ та датчика температури гарячого потоку повітря.

Відновлювати вимірювання непрацездатного датчика температури гарячого потоку повітря можна за таким же принципом. При використанні показань датчика температури холодного потоку повітря оцінювальні вимірювання формуватимуться за допомогою рівняння

$$\hat{x}_5(k) = x_3(k) + \theta(x_1(k)).$$
 (4.21)

Оціночні вимірювання за допомогою еталонної моделі виходять в результаті розв'язання системи рівнянь

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_{2}\left(\mathbf{k}+1\right) = \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\text{ox}}}\right) \hat{\mathbf{x}}_{2}\left(\mathbf{k}\right) + \frac{\kappa_{\text{ox}}T_{0}}{T_{\text{ox}}} \cdot \frac{\mathbf{u}_{\zeta}\left(\mathbf{k}\right)}{\kappa_{\text{np}}}; \\ \hat{\mathbf{x}}_{3}\left(\mathbf{k}+1\right) = \left(1 - \frac{T_{0}}{T_{\text{or}}}\right) \hat{\mathbf{x}}_{3}\left(\mathbf{k}\right) + \frac{\kappa_{\text{or}}T_{0}}{T_{\text{or}}} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{2}\left(\mathbf{k}\right). \end{cases}$$

$$(4.22)$$

Змінна  $\hat{x}_5(k)$  являє собою оціночне вимірювання датчика температури гарячого потоку повітря, що відповідає номінальному режиму функціонування ВЕ та датчика температури холодного потоку повітря.

З появою у приводі некомпенсованих видів дестабілізуючих впливів  $\{d_{12}; d_{14}; d_{16}; d_{18}; d_{20}; d_{22}\} \in \hat{D}_x$  може бути передбачений варіант наявності резервної пари датчиків температури. Вимірювання з обох пар датчиків реєструються постійно, однак у момент діагностування некомпенсованого виду модуль управління формує команду  $u_k(k)$  для перемикання системи на роботу з вимірюваннями резервного датчика температури, а вимірювання несправного датчика температури вважатимуть недійсними.

Функціональну схему такої реконфігурації можна представити на рис. 4.12.



Рис. 4.12. Функціональна схема реконфігурації датчиків температури для дестабілізації d<sub>12</sub>, d<sub>14</sub>, d<sub>16</sub>, d<sub>18</sub>, d<sub>20</sub> і d<sub>22</sub>

Таким чином, у разі виникнення дестабілізацій видів  $d_{11}$ ,  $d_{15}$ ,  $d_{17}$  і  $d_{21}$  використовується різницевий сигнал  $u_y'(k+1)$  (4.16), (4.17) для компенсації дестабілізуючого впливу.

Для відновлення працездатності датчика температури одного потоку повітря при d<sub>13</sub> чи d<sub>19</sub> розглянуто варіант реконфігурації управління, при якому, маючи дані про залежність температур холодного та гарячого потоків повітря, використовуються вимірювання датчика температури іншого потоку повітря. При некомпенсованих дестабілізуючих впливах d<sub>12</sub>, d<sub>14</sub>, d<sub>16</sub>, d<sub>18</sub>, d<sub>20</sub> i d<sub>22</sub>
здійснюється ізоляція несправного датчика температури та вводиться його резервний варіант, що забезпечує відновлення працездатності ОРУ.

4.2.4 Аналіз можливості застосування розроблених алгоритмів діагностування та відновлення працездатності при множинних дестабілізуючих впливах

У роботі не розглядається варіант множинних відмов: необхідність відновлення працездатності функціональних елементів ОРУ для множини парирування кількох дестабілізуючих впливів, що виникли в один момент часу. Однак особливості представленого раціонального управління дають можливість парирувати багаторазові дестабілізуючі впливи, послідовно відпрацьовуючи кожен вид окремо.

Для реалізації такого підходу принципово важливим є формування дихотомічного дерева діагностування, оскільки діагностування здійснюється саме його гілками та вузлами. Подана на рис. 3.6 структура спершу направить алгоритм діагностування аналізувати працездатності привода, потім – ВЕ, після чого буде обрано один із датчиків температури (залежно від вже наявної інформації).

Так, наприклад, якщо дестабілізація виникла і в приводі, і в ВЕ, модуль діагностики спочатку виявить несправний привод, потім модуль управління найбільш підходящий вибере засіб відновлення, під виявлений ВИД дестабілізуючого впливу – і в результаті цей вид буде парируваний. Однак, модуль діагностики все ще фіксуватиме непрацездатність ОРУ, тому процес діагностування відновиться. Тоді, згідно дихотомічним 3 деревом діагностування, буде виявлено несправний ВЕ, і почнеться процес відновлення його працездатності.

Тут слід зробити пояснення частини описаної процедури, коли ПРУ фіксує факт відновлення привода, але не фіксує відновлення працездатності всього

ОРУ. Адже раніше у роботі критерієм відновленого ОРУ виступало предикатний вираз (3.8). Якщо адаптувати ПРУ до роботи з множинними відмовами, цей критерій слід розширити за допомогою додаткових предикатних виразів, які використовуватимуться для визначення несправного функціонального елемента. Таким чином, стан ОРУ при раніше непрацездатному приводі можна оцінити як

$$\begin{cases} z_1 = 0; \\ z_0 = 0. \end{cases}$$
(4.23)

Якщо верхня умова виконується – це означає, що працездатність привода відновлена. Якщо при цьому також виконується нижня умова – тоді весь ОРУ працездатний та інші дестабілізації не були виявлені, інакше необхідно продовжити діагностування, як було описано в прикладі.

Для підтвердження повного відновлення працездатності ВЕ ПРУ потрібно виконання умов хибності відповідних предикатних виразів:

$$z_1 = 0 \cap z_2 = 0 \cap z_3 = 0 \cap z_0 = 0.$$
 (4.24)

При цьому важливо проводити перевірку z<sub>0</sub> в останню чергу, щоб уникнути отримання хибнопозитивного результату на працездатність ОРУ, оскільки у процесі відновлення є ймовірність взаємного впливу кількох несправностей.

Як згадувалося раніше, розташування функціональних елементів на дихотомічному дереві діагностування – це ключовий чинник правильного відновлення працездатності ОРУ при послідовному діагностуванні. Якщо ж відновлювати працездатність ВЕ при несправному приводі (для спрощення припустимо, що регулюючий вентиль все ж таки здатний переміститися на необхідну відстань), то виконання умови  $z_2 \cap z_3 = 0$  буде хибнопозитивним. І після відновлення працездатності привода модуль діагностики може повторно

виявити несправність у ВЕ. Фрагмент неправильно сформованого дихотомічного дерева діагностування представлено на рис. 4.13.



Рис. 4.13. Фрагмент неправильно сформованого дихотомічного дерева діагностування

Поряд з правильною процедурою діагностування, важливо парирувати дестабілізацію в розумному порядку. Наприклад, дестабілізуючі впливи призвели до несправності ВЕ та датчика температури холодного потоку повітря. Оскільки виміри цього датчика температури використовуються для діагностування стану ВЕ, то доцільно спочатку відновити працездатність датчика, а потім переконатися в тому, що ВЕ дійсно несправний і це не був хибнонегативний результат.

Висновки до розділу 4

1. Розглянуто особливості методу відновлення працездатності ОРУ з використанням лінійних діагностичних моделей та таких засобів відновлення як

сигнальне підстроювання, реконфігурація алгоритмів, використання еталонних моделей, коригування вимірювань та реконфігурація апаратури.

2. Проведено аналіз впливу надмірності ресурсів на якість відновлення працездатності ОРУ з метою визначення доцільності використання надлишкових та резервних засобів відновлення.

3. Отримав подальший розвиток метод формування алгоритмів відновлення працездатності функціональних елементів ОРУ за рахунок конкретизації використання лінійних діагностичних моделей та засобів парирування дестабілізуючих впливів.

4. Отримано за допомогою цього методу алгоритми відновлення працездатності привода при компенсованих видах дестабілізації за допомогою використання сигнального підстроювання та при некомпенсованих видах дестабілізації за допомогою заміни непрацездатного привода резервним.

5. Розроблено алгоритми відновлення працездатності ВЕ при компенсованих видах дестабілізації, що дозволяють за допомогою додаткових сигналу та алгоритмів парирувати зміни коефіцієнтів передачі та сталих часу ВЕ.

6. Розроблено алгоритми відновлення працездатності ВЕ при некомпенсованих видах дестабілізації, які дозволяють перейти на інші режими функціонування, що забезпечують необхідні показники якості ВЕ.

7. Сформовано алгоритми відновлення вимірювань датчиків температури при компенсованих видах дестабілізації за допомогою коригування вимірювань та при некомпенсованих видах дестабілізації за допомогою використання еталонних моделей та реконфігурації алгоритмів.

8. Розглянуто можливості застосування розроблених алгоритмів діагностування та відновлення для аналізу множинних відмов із використанням принципу послідовного відновлення працездатності ОРУ.

### РОЗДІЛ 5

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ РАЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВИХРОВИМ ЕНЕРГОРОЗДІЛЬНИКОМ МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

5.1. Опис елементів моделі раціональної системи управління у середовищі Simulink

Структура моделі раціональної системи управління ВЕ реалізована у середовищі Simulink [83-87] і представлена на рис. 5.1. Simulink-модель розроблена на підставі рис. 3.1 і рис. 3.3.



Рис. 5.1. Simulink-модель раціональної системи управління ВЕ

Дискретний розв'язувач із фіксованим кроком обчислює час наступного кроку симуляції, додаючи фіксований розмір кроку до поточного часу. Точність і тривалість моделювання залежать від розміру кроків, якими виконується моделювання: чим менший розмір кроку, тим точніші результати, але довше виконується моделювання. Крім цього, крок дискретизації безпосередньо впливає на швидкодію ПРУ, час діагностування та відновлення. Тому при виборі цього параметра враховується частота дискретизації контролера, який виконує функції ПРУ. Так, середня частота дискретизації мікроконтролерів Arduino або STM32 (найпоширеніших та найпростіших в інтегруванні) знаходиться в діапазоні від кількох кілогерц (кГц) до кількох мегагерц (МГц). Таким чином, для моделювання раціональної системи управління встановлено оптимальне значення кроку дискретизації 0,001 с.

Simulink-модель складається з наступних блоків:

– ПРУ. Модуль діагностики отримує вхідний сигнал (u), сигнали ОАУ  $(\hat{u}_{dx}, \hat{u}_{dr}, \hat{u}_{\zeta})$  і сигнали ОРУ  $(\tilde{u}_{dx}, \tilde{u}_{dr}, \tilde{u}_{\zeta})$ , потім формує Ď для модуля управління. На підставі поточного стану працездатності ОРУ він, у свою чергу, передає сигнал управління u<sub>y</sub> та тиску вхідного потоку повітря P<sub>cT</sub> (для спрощення схеми компресор як функціональний блок був опущений). Також залежно від виду дестабілізуючого впливу модуль управління формує відповідний сигнал u<sub>к</sub> для відновлення працездатності ОРУ.

– ОАУ. Еталонна модель реалізована за структурною схемою (рис. 3.2), відтворює оціночні значення  $\hat{u}_{dx}$ ,  $\hat{u}_{dr}$  і  $\hat{u}_{\zeta}$  для модуля діагностики. Математичні моделі функціональних елементів визначені у розділі 2. Функція «Режим роботи BE» відповідає за перемикання між математичними моделями BE (рис. 2.14 і 2.15) для заданого значення тиску P<sub>ct</sub>. Simulink-модель ОАУ представлена на рис. 5.2.

– ОРУ. В основі цього блоку лежить реалізація моделі ОАУ. З урахуванням рис. 3.1 та засобів відновлення працездатності, описаних у розділі 4, у цьому блоці генерується дестабілізація D<sub>i</sub> (цей вплив змодельовано згідно з дихотомічним деревом), що впливає на певний функціональний елемент ОРУ, а також приймається сигнал u<sub>к</sub> від модуля управління.



Рис. 5.2. Simulink-модель ОАУ

Модуль діагностики діагностичні моделі включає визначення дестабілізуючого впливу. Область «Алгоритм виявлення дестабілізації» відповідає рис. 3.3 та реалізує предикатне рівняння (3.6). Обробляючи інформацію від ОАУ та ОРУ і порівнюючи її з допуском на відхилення δ<sub>0</sub>, визначається значення логічної змінної z<sub>0</sub>. Для вирішення наступних задач діагностування реалізована функція «Діагностичні моделі», що включає в себе вирази (3.12), (3.13), (3.14), (3.18), (3.25), (3.30), (3.38), (3.43), (3.47), (3.51), (3.57), (3.60), (3.63), (3.66), (3.69), (3.72), (3.75), (3.78), (3.81) і (3.84). Таким чином, визначається конкретний вид дестабілізуючого впливу з відомого набору di (рис. 3.6).

На додаток до основних блоків системи управління ВЕ реалізовано інтеграцію резервних функціональних елементів (рис. 5.4), згідно з реконфігурацією апаратури, описаною у розділі 4.

Залежно від сформованого сигналу и<sub>к</sub> модель виводить із системи управління несправний елемент (рис. 5.1) і включає резервний варіант, математична модель якого відповідає еталонній моделі ОАУ.



Рис. 5.3. Simulink-модель модуля діагностики



Рис. 5.4. Simulink-модель резервних функціональних елементів

Таким чином, роботу моделі раціональної системи управління ВЕ можна описати так: на модуль діагностики подається бажаний вхідний сигнал u; при початкових умовах на ОРУ дестабілізації відсутні, тобто модуль управління визначає ОРУ як працездатний, і передає вхідний сигнал на ОРУ та ОАУ у вигляді управляючого впливу  $u_y$  і робочого тиску  $P_{ct}$ . У працездатному стані ОРУ обробляє управляючий сигнал аналогічно еталонним моделям ОАУ, тоді модуль діагностики, приймаючи набори вихідних сигналів, реєструватиме працездатність ОРУ за рахунок алгоритму виявлення дестабілізуючих впливів.

У довільний момент часу генерується довільний вид дестабілізуючого впливу (1 із 23) – і вихідні сигнали ОРУ починають змінюватися відповідним чином. По досягненню допуску на відхилення  $\delta_0$  в модулі діагностики фіксується наявність дестабілізації у роботі ОРУ – і запускає алгоритм її ідентифікації, виконуючи послідовно процедуру діагностування (рис. 3.6). Протягом періоду діагностування на модуль управління не надходить нова інформація, отже ОРУ продовжує піддаватися дестабілізації. У момент повного діагностування модуль управління отримує сигнал про конкретний вид дестабілізуючої дії – і запускає відповідний алгоритм відновлення.

В залежності від обраного способу відновлення вихідні сигнали u<sub>y</sub>, P<sub>ст</sub> і / або u<sub>к</sub> будуть змінюватись та впливати на несправний функціональний елемент ОРУ відповідним певним чином. За рахунок зворотного зв'язку процес відновлення продовжуватиметься доти, доки модуль діагностики однозначно не зафіксує працездатний стан ОРУ.

## 5.2. Вибір інтервалів діагностування та допусків на відхилення

## 5.2.1. Реалізація переходів по дереву діагностування

Основним завданням, яке додатково вирішувалося на етапі комп'ютерного моделювання, було визначення інтервалів діагностування [k<sub>i</sub>; k<sub>i</sub>] та допуску на

відхилення δ<sub>і</sub>. Ці параметри є атрибутами діагностичних моделей, що задають своєчасну та правильну поетапну ідентифікацію дестабілізації, і, як наслідок, здійснюється виправданий вибір відповідного алгоритму відновлення працездатності. Так, якщо інтервал діагностування або величина допуску досить малі, то за непряму ознаку дестабілізуючого впливу прийматимуться аномальні разові сплески сигналів або допустимі похибки виконавчих пристроїв чи вимірювальних приладів. Якщо ж інтервал діагностування або величина допуску великі. тоді навіть очевидні (для стороннього спостерігача) ознаки непрацездатного стану ОРУ не реєструватимуться модулем діагностики.

Інтервал діагностування та величина допуску безпосередньо впливають на переходи між предикатними виразами, вузлами дерева діагностування, тому спочатку пропонується розглянути алгоритм встановлення значення предикатного виразу. Він реалізований у вигляді Simulink-діаграми (рис. 5.5), що є автоматом кінцевих станів [88-92].

Стан «START» для системи є початковим станом, при якому алгоритми діагностування неактивні, і інформація на вхід модуля діагностики ще не надходить. Також система переходить у цей стан після відновлення працездатності, іншими словами, відбувається перезавантаження ПРУ і, по суті, відсікається успішне парирування дестабілізуючого впливу. Стан «START» містить лише одну локальну змінну k, що приймає значення «0». Він виконує функцію відліку тактів часу для порівняння із заданим значенням інтервалу діагностування. Запуск алгоритму здійснюється у стані «MONITORING», у момент подачі на вхід діаграми поточного значення сигналу іп (in  $\ge$  0). Цей сигнал відповідає за відхилення непрямих ознак, лівої частини підпредикатної нерівності. Особливість реалізації очікування системи у стані «START» буде описано далі.



Рис. 5.5. Simulink-діаграма встановлення значення предикатного виразу

Перебуваючи у стані «MONITORING», система безперервно перевіряє виконання підпредикатної нерівності, наприклад (3.8). У цьому стані використовується параметр tol, який відповідає значенню допуску  $\delta_i$ , і вхідний сигнал іп. Згідно з поданою умовою, якщо сигнал іп перевищує заданий допуск tol, то значення змінної к збільшується на одиницю. Так, кількість тактів зростатиме доти, доки:

1) цей відлік часу не перевищить заданий для конкретного предиката інтервал діагностування (відхилення непрямої ознаки безперервно фіксується достатньо часу, щоб стверджувати про виконання нерівності);

 або поки не буде зафіксовано момент часу, за якого сигнал іп буде менше допуску tol (відхилення непрямої ознаки на проміжку заданого інтервалу [k<sub>i</sub>; k<sub>j</sub>] безперервно не перевищує допуск, отже – нерівність не виконується).
 Відповідно значення змінної к обнулиться, і відлік почнеться заново, як тільки відхилення знову перевищить допуск. У разі першого сценарію система перейде у стан «DETECTED» по досягненню к значення 100 мс. Тоді в даному випадку логічна змінна z<sub>i</sub> буде дорівнювати 1 – і ця величина запустить роботу наступної подібної діаграми (здійснюється перехід по гілці дихотомічного дерева діагностування). Система буде знаходитись у стані «DETECTED» до повного відновлення працездатності ОРУ, що й перезапустить алгоритм – і система примусово повернеться до стану «START».

Примітка: одномоментне встановлення значення «0» у стані «DETECTED» є захисним програмуванням, щоб система змогла відпрацювати перехід до наступного предикатного виразу (перехід по гілці дихотомічного дерева діагностування).

Система також може перейти зі стану «MONITORING» у стан «DETECTED 0». Станеться це у разі істинності вхідного сигналу detected. Він відображає початок роботи наступного алгоритму ідентифікації. Оскільки логічна змінна z<sub>i</sub> може приймати значення або «1», або «0», то цей підхід дозволяє визначити різницю між ще не виявленим типом дестабілізації та встановленим типом, якому відповідає значення «0». На цьому етапі основний ризик помилкового визначення значення логічної змінної пов'язаний із вибором інтервалу діагностування. Так, наприклад, за малого часу аналізу інформації алгоритм може передчасно, невірно ухвалити рішення про наявність дрейфу нуля, не дочекавшись моменту часу, коли відхилення перевищить заданий допуск. Система також перебуватиме в «DETECTED 0», будучи в режимі очікування примусового перезапуску алгоритму (аналогічно стану «DETECTED»).

На додаток до описаного алгоритму: кожної логічної змінної z<sub>i</sub> установлено квазі-значення NaN (не «0» і не «1»). Таким чином виключається інтерпретація «0» як «нічого» або «порожнє значення», цим запобігається помилкове переміщення по дихотомічному дереву діагностування. Приклад реалізації подано на рис. 5.6.



Рис. 5.6. Пример реалізації запуска алгоритму роботи конкретного предиката

Таким чином, поки ОРУ вважається працездатним ( $z_0 = 0$ ), алгоритм роботи з предикатом  $z_1$  знаходиться у стані «START», оскільки вхідному сигналу іп встановлено квазі-значення NaN. А також сам предикат  $z_1 = NaN$ , щоб уникнути помилкового «0». У момент визначення факту дестабілізації ( $z_0 = 1$ ) на вхід алгоритму подається поточне значення відхилення іп (система переходит у стан «MONITORING», як описано вище).

## 5.2.2. Вибір інтервалів діагностування

Першим атрибутом діагностичних моделей, який буде розглянуто у цій роботі, це інтервал діагностування [k<sub>i</sub>; k<sub>i</sub>]. Цей атрибут визначається виходячи з якісної оцінки функціонування управління, системи характеристик елементів ОРУ, особливостей діагностичних функціональних моделей, емпіричним методом. За замовчуванням інтервал становить 100 мс. В результаті серії експериментів було визначено, що 100 часових тактів достатньо, щоб унеможливити аномальні відхилення, пропуски при зчитуванні даних, врахувати допустимі похибки (шуми, перешкоди) вимірювальних пристроїв. На рис. 5.7 у якості роботи моделі у стані «MONITORING» наведено фрагмент комплексного відхилення непрямих ознак (рис. 5.3).



Рис. 5.7. Фрагмент комплексного відхилення непрямих ознак

Передбачається, що допустима похибка вимірювань становить  $\pm 5$  мВ. Дестабілізація виникає на 2 с; допуск на відхилення складає 0,015  $\cdot$  Δu. Таким чином, враховуючи описану вище реалізацію, наведений алгоритм виявлення дестабілізуючого впливу (рис. 5.3) працюватиме наступним чином: система перебуває в стані «MONITORING» з моменту запуску симуляції та в моменти часу, коли похибка перевищуватиме заданий поріг, значення змінної k буде збільшуватись і обнулятися в іншому випадку. Так, оновлюючи вибірку з фіксованим часовим діапазоном, система досягне інтервалу [2,55; 2,65], в якому відхилення завжди перевищуватиме заданий допуск. Таким чином, враховуючи інерційні властивості OPУ та допустимі похибки вимірювань, на виявлення факту дестабілізації витрачено 0,65 с для прикладу, що розглядається.

З іншого боку, хоча збільшення інтервалу [k<sub>i</sub>; k<sub>j</sub>] може сприяти більш надійній обробці вхідного масиву вимірювань, воно негативно позначиться на часі діагностування. Так, за запропоновані 100 мс для кожного предикатного рівняння на діагностування компенсованого дрейфу робочої точки ВЕ (рис. 3.6) піде щонайменше 0,7 с без урахування інерційних властивостей ОРУ. Для порівняння, збільшення інтервалу до 300 мс призведе до того, що на діагностування буде витрачено більше 2 с.

Для предикатних рівнянь z<sub>2</sub> (3.13) і z<sub>3</sub> (3.14) інтервал діагностування визначається індивідуально. Пов'язано це з тим, що при номінальному режимі роботи системи наявні канали холодного і гарячого потоків повітря є незалежними для вимірювань і самостійними з погляду допустимих похибок. Внаслідок лінеаризації статичних характеристик ВЕ (рис. 2.14, 2.15) були визначені похибки різної величини, датчики температури також мають індивідуальні характеристики тому діагностування несправного ВЕ вимагає достовірної інформації для двох предикатів. Нехтування цією особливістю спричинить помилкову діагностику несправних датчиків при несправному ВЕ: якщо після визначення істинного значення z<sub>2</sub> алгоритм не зафіксує істинне значення z<sub>3</sub> за 100 мс (інтервал прийнятий за замовчуванням), тоді модуль діагностики буде відпрацьовувати помилково діагностований датчик температури холодного потоку повітря, і навпаки, якщо підпредикатний вираз z<sub>2</sub> не перевищив заданий допуск протягом 100 мс після того, як алгоритм визначив істинне значення z<sub>3</sub>, то хибно діагностованим елементом буде датчик температури гарячого потоку повітря.

Так, для кожного відомого типу дестабілізуючого впливу на ВЕ було встановлено ряд значень величин дестабілізацій, які сприяють мінімальному перевищенню відхилення непрямої ознаки. Цей підхід дозволяє визначити максимальний час очікування реєстрації достовірних значень z<sub>2</sub> i z<sub>3</sub>. На рис. 5.8 наведено відхилення непрямих ознак при зміні інерційності ВЕ на 3 с моделювання.



a)



Рис. 5.8. Відхилення непрямих ознак  $\Delta u_{\text{дх}}$  (а) та  $\Delta u_{\text{дг}}$  (б)

Аналіз наведених графіків показує, що предикат  $z_2$  реєструється як істинний на 11,8 с і предикат  $z_3$  – на 5,6 с. Так, для цього окремого випадку часовий діапазон на діагностування становить 6,2 с. Для того, щоб охопити граничні випадки, у модель було закладено інтервал 7 с.

Таким чином, для діагностики функціональних елементів на підставі предикатів z<sub>2</sub> і z<sub>3</sub> були закладені граничні значення інтервалів:

 мінімальний інтервал діагностування становить 100 мс – якщо обидва відхилення непрямих ознак перевищать відповідні допуски, то система все ще продовжуватиме перебувати в стані «MONITORING» до кінця інтервалу в 100 мс;

– максимальний інтервал діагностування складається 7 с – тобто у разі несправності одного з датчиків температури, система перебуватиме в стані «MONITORING» протягом 7 с, після чого алгоритм виключить варіант несправного BE і прийме рішення про несправність якогось з датчиків температури.

## 5.2.3. Вибір допусків на відхилення

Другим атрибутом діагностичних моделей, який безпосередньо визначає швидкодію та достовірність діагностування, є допуск на відхилення  $\delta_i$ , що використовується для подання предикатних рівнянь.

Як було представлено на рис. 5.3, допуск на відхилення предикатного рівняння  $\delta_0$  являє собою векторну величину, що включає допуски на відхилення вихідних сигналів датчиків температури холодного  $\delta_x$  і гарячого  $\delta_r$  потоків повітря.

$$\delta_0 = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_r^2}.$$
(5.1)

Таке рішення дозволяє врахувати оцінку незалежних каналів вимірювання температури.

Графічно ця залежність представлена рис. 5.9: область незаштрихованого сегмента визначає справну роботу ОРУ, будь-яка точка на зовнішній заштрихованій області вказує на наявність дестабілізуючого впливу.

Складові допуску  $\delta_x$  і  $\delta_r$  враховують такі параметри як допустима похибка вимірювання датчика температури, похибка лінеаризації статичної характеристики ВЕ та допустимий діапазон відхилень за наявності перешкод та шумів. Таким чином, кожна складова допуску є допуском на відхилення непрямих ознак окремо, іншими словами,  $\delta_x = \delta_2$  та  $\delta_r = \delta_3$ .



Рис. 5.9. Відхилення непрямих ознак  $\Delta u_{dx}$  (a) та  $\Delta u_{dr}$  (б)

Допуск  $\delta_1$  на відхилення  $\Delta u_{\zeta}$  також визначається похибкою лінеаризації  $\delta_{\pi}$ . Оскільки основними параметрами аналізованої ОРУ є температура холодного і гарячого потоку повітря, то буде виправданим зневага відхиленням  $\Delta u_{\zeta}$ , при якому температура перебуває у допуску. Цю залежність можна уявити як

$$\delta_{1} = \min\left(\frac{\delta_{\Pi X}}{\kappa_{\text{ox}}}, \frac{\delta_{\Pi \Gamma}}{\kappa_{\text{or}}}\right), \tag{5.2}$$

де  $\delta_{nx}$  і  $\delta_{nr}$  – похибки лінеаризації статичних характеристик ВЕ, представлених на рис. 2.14 та рис. 2.15 відповідно.

Допуски на відхилення підпредикатних виразів  $\delta_{ij}$ , пов'язаних з визначенням типу дестабілізуючого впливу (3.18), (3.25), (3.30), (3.38), (3.43), (3.47), (3.51), характеризуються обчислювальною похибкою середовища моделювання є [93]. Відповідні предикатні рівняння були отримані таким чином, щоб істинність предиката встановлювалася при порівнянні лівої частини рівняння з нулем.

$$\delta_{ij} = \varepsilon \approx 0. \tag{5.3}$$

Допуски на визначення видів дестабілізуючого впливу, вони ж граничні значення відхилень прямих ознак, описаних у підрозділі 3.2.4, приймаються експертом, покладаючись на свої знання предметної галузі, досвід та конкретні вимоги системи або процесу, що розглядається. Ключовими факторами, які враховує експерт, можуть бути специфікації проекту, порівняльний аналіз, оцінка ризиків, вимоги зацікавлених сторін, вартість, здійсненність тощо.

5.3. Комп'ютерне моделювання функціонування розробленої раціональної системи управління вихровим енергороздільником

### 5.3.1. Діагностування та відновлення працездатності привода

За допомогою комп'ютерного моделювання функціонування раціональної системи управління ВЕ було застосовано розроблені алгоритми діагностування дестабілізуючих впливів (рис. 3.6) та відновлення працездатності ОРУ.

На рис. 5.10 представлені графіки сигналів, що відображають процеси діагностування та відновлення працездатності привода при появі дестабілізуючого впливу у вигляді компенсованого дрейфу нуля (d<sub>3</sub>).



a)



б)



B)





c)

-0,5

165



ж)

Рис. 5.10. Графіки процесів діагностування та відновлення працездатності привода при компенсованому дрейфі нуля (d<sub>3</sub>)

При подачі в момент часу t = 1 с імпульсного управляючого сигналу u<sub>y</sub> з амплітудою 0,1 В та тривалістю  $\Delta t = 3$  с (рис. 5.10, а) конусний вентиль починає переміщуватися (рис. 5.10, б), і на виході ОРУ спостерігається зміна напруги датчиків температури холодного (рис. 5.10, є) і гарячого (рис. 5.10, ж) потоків повітря.

В момент часу t = 5 с з'являється компенсований дрейф нуля привода величиною -0,2 мм (рис. 5.10, в). Дрейф нуля позначився на характеристиці положення конусного вентиля (рис. 5.10, б). Цей дестабілізуючий вплив було виявлено за допомогою предиката  $z_0$  (3.8) в момент часу t = 6,1 с (рис. 5.10, г). Після виявлення дестабілізації у функціонуванні ОРУ було ідентифіковано несправний привод за допомогою предиката  $z_1$  (3.12) (рис. 5.10, г); встановлено його тип за допомогою предиката  $z_{11}$  (3.18) (рис. 5.10, д); визначено його вид за допомогою предиката  $z_{110}$  (3.57) в момент часу t = 6,2 с (рис. 5.10, е).

На момент часу t = 6,3 с, згідно з функціональною схемою сигнальної компенсації (рис. 4.4), був реалізований різницевий сигнал  $\Delta u_y(k)$  у формі імпульсного впливу з амплітудою 0,1 В та тривалістю  $\Delta t = 1,1$  с (рис. 5.10, а). На

момент часу t = 7,4 с відновлено працездатність привода (рис. 5.10, б) і починається процес відновлення працездатності ОРУ, який триває до часу t = 12 с (рис. 5.10, г) та про що свідчить нульове значення предиката  $z_0$ , що означає закінчення процесу відновлення працездатності ОРУ.

Для даного випадку час діагностування становить  $\Delta t_{\rm d} = 1,2$  с; час відновлення привода становить  $\Delta t_{\rm B1} = 1,1$  с; час відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\rm B2} = 5,8$  с. Загальний час від моменту виникнення дестабілізації до відновлення ОРУ (момент часу, коли розбіжність між вихідними сигналами ОРУ та еталонної моделі стає менше 5 %) становить  $\Delta t_{\Sigma} = 7$  с. Тоді як час перехідного процесу еталонної моделі  $\Delta t_{\rm nn}$  становить 27 с для каналу холодного потоку повітря і 30 с – для каналу гарячого потоку повітря. Таким чином, ОРУ відновлює свою працездатність у межах перехідного процесу. Відносна похибка при встановлених значеннях перехідних процесів складає  $\delta_{\rm B} = 3,3$  %.

# 5.3.2. Діагностування та відновлення працездатності вихрового енергороздільника

На рис. 5.11 представлені графіки сигналів, що відображають процеси діагностування та відновлення працездатності ВЕ при появі дестабілізуючого впливу у вигляді компенсованої зміни сталої часу (d<sub>7</sub>).



a)



168

б)



в)



г)





3)

169



и)



Рис. 5.11. Графіки процесів діагностування та відновлення працездатності ВЕ при компенсованій зміні сталої часу (d7)

i)

При подачі в момент часу t = 1 с імпульсного управляючого сигналу u<sub>y</sub> з амплітудою 0,1 В та тривалістю  $\Delta t = 3$  с (рис. 5.11, а) конусний вентиль починає переміщуватися (рис. 5.11, б), і на виході ОРУ спостерігається зміна напруги датчиків температури холодного (рис. 5.11, и) і гарячого (рис. 5.11, і) потоків повітря.

В момент часу t = 5 с з'являється компенсована зміна сталої часу ВЕ величиною 6 с (рис. 5.11, в), що відображається на характеристиках датчиків температури. Цей дестабілізуючий вплив було виявлено за допомогою предиката  $z_0$  (3.8) в момент часу t = 5,2 с (рис. 5.11, г). Після виявлення дестабілізації у функціонуванні OPV було ідентифіковано несправний BE за допомогою предикатів  $z_1$  (3.12) (рис. 5.11, г),  $z_2$  (3.13) (рис. 5.11, д) і  $z_3$  (3.14) (рис. 5.11, е); встановлено його тип за допомогою предикатів  $z_{31}$  (3.25) (рис. 5.11,  $\epsilon$ ) і  $z_{32}$  (3.30) (рис. 5.11, ж); визначено його вид за допомогою предиката  $z_{321}$  (3.63) в момент часу t = 6,2 с (рис. 5.11, з).

На момент часу t = 6,3 с, згідно з функціональною схемою сигнальної компенсації (рис. 4.6), був реалізований різницевий сигнал  $\Delta u_y(k)$  (рис. 5.11, а). На момент часу t = 9,1 с працездатність ВЕ відновлена, про що свідчить нульове значення предиката z<sub>0</sub> (рис. 5.11, г).

Для даного випадку час діагностування становить  $\Delta t_{\rm d} = 1,2$  с; час відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\rm B} = 2,9$  с. Так, загальний час від моменту виникнення дестабілізації до відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\Sigma} = 4,1$  с. Тоді як час перехідного процесу еталонної моделі  $\Delta t_{\rm nn}$  становить 27 с для каналу холодного потоку повітря і 30 с – для каналу гарячого потоку повітря. Таким чином, ОРУ відновлює свою працездатність в межах перехідного процесу. Відносна похибка при встановлених значеннях перехідних процесів складає  $\delta_{\rm B} = 7,2$  %.

# 5.3.3. Діагностування та відновлення працездатності датчика температури холодного потоку повітря

На рис. 5.12 представлені графіки сигналів, що відображають процеси діагностування та відновлення працездатності датчика температури холодного потоку повітря при появі дестабілізуючого впливу у вигляді компенсованої зміни коефіцієнта передачі (d<sub>11</sub>).



в)



г)





д)



e)



c)









и)

Рис. 5.12. Графіки процесів діагностування та відновлення працездатності датчика температури холодного потоку повітря при компенсованій зміні коефіцієнта передачі (d<sub>11</sub>)

При подачі в момент часу t = 1 с імпульсного управляючого сигналу u<sub>y</sub> з амплітудою 0,1 В та тривалістю  $\Delta t = 3$  с (рис. 5.12, а) конусний вентиль починає переміщуватися (рис. 5.12, б), і на виході ОРУ спостерігається зміна напруги датчика температури холодного потоку повітря (рис. 5.12, и).

В момент часу t = 5 с з'являється компенсована зміна коефіцієнта передачі датчика температури холодного потоку повітря на величину -0,04 В/°С (рис. 5.12, в), що відображається на характеристиці датчика (рис. 5.12, и). Цей дестабілізуючий вплив було виявлено за допомогою предиката  $z_0$  (3.8) в момент часу t = 5,2 с (рис. 5.12, г). Після виявлення дестабілізації в функціонуванні ОРУ було ідентифіковано несправний датчик температури холодного потоку повітря за допомогою предикатів  $z_1$  (3.12) (рис. 5.12, г),  $z_2$  (3.13) (рис. 5.12, д) і  $z_3$  (3.14) (рис. 5.12, е); встановлено його тип за допомогою предиката  $z_{33}$  (3.38) (рис. 5.12,  $\epsilon$ ); визначено його вид за допомогою предиката  $z_{331}$  (3.69) в момент часу t = 12,5 с (рис. 5.12, ж).

На момент часу t = 12,6 с, згідно з функціональною схемою сигнального підстроювання (рис. 4.9), було сформоване сигнальне підстроювання  $u_{\kappa}(k)$  (рис. 5.12, з). Відповідна реакція системи на сигнальне підстроювання відображається на характеристиці датчика (рис. 5.12, и). На момент часу t = 12,9 с працездатність датчика температури холодного потоку повітря відновлена, про що свідчить нульове значення предиката  $z_0$  (рис. 5.12, г).

Для даного випадку час діагностування становить  $\Delta t_{\rm d} = 7,5$  с; час відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\rm B} = 0,4$  с. Так, загальний час від моменту виникнення дестабілізації до відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\Sigma} = 7,9$  с. Тоді як час перехідного процесу еталонної моделі становить  $\Delta t_{\rm nn} = 27$  с. Таким чином, ОРУ відновлює свою працездатність в межах перехідного процесу. Відносна похибка при встановлених значеннях перехідних процесів складає  $\delta_{\rm B} = 2,4$  %.

## 5.3.4. Діагностування та відновлення працездатності датчика температури гарячого потоку повітря

На рис. 5.13 представлені графіки сигналів, що відображають процеси діагностування та відновлення працездатності датчика температури гарячого потоку повітря при появі дестабілізуючого впливу у вигляді некомпенсованого дрейфу нуля (d<sub>22</sub>).





б)



в)



г)





д)



e)



c)



ж)



Рис. 5.13. Графіки процесів діагностування та відновлення працездатності датчика температури гарячого потоку повітря при некомпенсованому дрейфі нуля (d<sub>22</sub>)

i)

При подачі в момент часу t = 1 с імпульсного управляючого сигналу  $u_y$  з амплітудою 0,1 В та тривалістю  $\Delta t = 3$  с (рис. 5.13, а) конусний вентиль починає

переміщуватися (рис. 5.13, б), і на виході ОРУ спостерігається зміна напруги датчика температури гарячого потоку повітря (рис. 5.13, і).

В момент часу t = 5 с з'являється компенсований дрейф нуля датчика температури гарячого потоку повітря величиною 0,6 В (рис. 5.13, в), що відображається на характеристиці датчика (рис. 5.13, і). Цей дестабілізуючий вплив було виявлено за допомогою предиката  $z_0$  (3.8) в момент часу t = 5,1 с (рис. 5.13, г). Після виявлення дестабілізації в функціонуванні ОРУ було ідентифіковано несправний датчик температури гарячого потоку повітря за допомогою предикатів  $z_1$  (3.12) (рис. 5.13, г),  $z_2$  (3.13) (рис. 5.13, д) і  $z_3$  (3.14) (рис. 5.13, є); встановлено його тип за допомогою предикатів  $z_{35}$  (3.47) (рис. 5.13, є) і  $z_{36}$  (3.51) (рис. 5.13, ж); визначено його вид за допомогою предиката  $z_{361}$  (3.84) в момент часу t = 19,5 с (рис. 5.13, з).

На момент часу t = 19,6 с була сформована управляюча команда  $u_{\kappa}(k)$  (рис. 5.13, и), яка згідно з функціональною схемою реконфігурації датчиків (рис. 4.12), перемикає систему на роботу з вимірюваннями резервного датчика температури гарячого потоку повітря. Відповідна реакція системи на управляючу команду відображається на характеристиці датчика (рис. 5.13, і). На момент часу t = 19,7 с працездатність датчика температури гарячого потоку повітря відновлена, про що свідчить нульове значення предиката z<sub>0</sub> (рис. 5.13, г).

Для даного випадку час діагностування становить  $\Delta t_{\rm d} = 14,5$  с; час відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\rm B} = 0,2$  с. Так, загальний час від моменту виникнення дестабілізації до відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\Sigma} = 14,7$  с. Тоді як час перехідного процесу еталонної моделі становить  $\Delta t_{\rm nn} = 30$  с. Таким чином, ОРУ відновлює свою працездатність в межах перехідного процесу. Відносна похибка при встановлених значеннях перехідних процесів складає  $\delta_{\rm B} = 0,5$  %.

Розроблена модель раціональної системи управління дозволяє отримати результати діагностування кожного виду дестабілізації (рис. 3.6) і відповідного способу відновлення працездатності ОРУ. Додаткові результати моделювання роботи моделі раціональної системи управління при дії різних видів дестабілізуючих впливів на ВЕ наведено у додатку А. Отримано в результаті обробки експериментальних характеристик результати якісних показників раціонального управління:  $\Delta t_{d} = [1,2; 14,5]$  с,  $\Delta t_{B} = [0,2; 6,2]$  с,  $\delta_{B} = [0,5; 7,5]$  %. Розбіжність у якісних показниках пояснюється наступним:

1) діагностування дестабілізації у приводі проводиться швидше за рахунок того, що вихідний сигнал  $u_{\zeta}$  однозначно визначає цей функціональний елемент. Діагностування дестабілізації в датчиках температури потребує більше часу, оскільки вихідні сигнали  $u_{dx}$  і  $u_{dr}$  окремо однозначно не визначають функціональний елемент, отже, потрібен додатковий час для виключення ВЕ з переліку несправних елементів, (підрозділ 5.2.2);

2) предикатні рівняння сформовані в такий спосіб, що крайній варіант визначається шляхом виключення. Тобто, наприклад, для діагностування зміни сталої часу ВЕ використовується предикат z<sub>32</sub> (3.30), який сформований для дрейфу робочої точки ВЕ. Цей фактор суттєво впливає на точність обчислення величини непрямої ознаки та, як наслідок, на точність відновлення;

3) структурою дихотомічного дерева діагностування – оскільки процедура діагностування є покроковою, то виявлення крайнього випадку дестабілізації необхідно отримати відповідний хибний діагноз від усіх попередніх предикатних рівнянь. Цей фактор безпосередньо впливає на час діагностування;

4) основним чинником, що впливає час відновлення, є час реакції ОРУ на додатковий сигнал управління. Тобто, якщо для відновлення працездатності ОРУ потрібен аналіз реакції ВЕ на сигнал підстроювання, то інерційність ВЕ впливатиме на час відновлення. При несправному датчику температури час відновлення ОРУ буде мінімальним за рахунок того, що додаткове функціонування ОРУ не задіяне, і відновлення в конкретних випадках обмежується підстроюванням у вигляді цифрового сигналу.

Отримано результати про принципову можливість раціонального управління ВЕ відновлювати працездатність ОРУ за умов впливу множинних
різнотипних дестабілізуючих впливів (підрозділ 4.2.4). Результати цього моделювання наведено у додатку А.

Висновки до розділу 5

1. У середовищі Simulink розроблена модель раціональної системи управління ВЕ, яка включає модулі діагностики та управління, математичні моделі ОАУ та ОРУ, імітацію дестабілізуючого впливу. Simulink-модель розроблена, ґрунтуючись на інформації, наведеній у розділах 2-4.

2. Наведено графіки процесів діагностування та відновлення працездатності ОРУ для наступних видів дестабілізуючих впливів:

компенсований дрейф нуля привода (d<sub>3</sub>);

- компенсована зміна сталої часу ВЕ (d<sub>7</sub>);

компенсована зміна коефіцієнта передачі датчика температури холодного потоку повітря (d<sub>11</sub>);

некомпенсований дрейф нуля датчика температури гарячого потоку повітря (d<sub>22</sub>).

Наведені результати підтверджують успішне виконання процедур діагностування та відновлення працездатності ОРУ.

3. У результаті обробки експериментальних характеристик отримано наступні результати якісних показників раціонального управління:  $\Delta t_{\rm I} = [1,2; 14,5]$  с,  $\Delta t_{\rm B} = [0,2; 6,2]$  с,  $\delta_{\rm B} = [0,5; 7,5]$  %.

4. Результати моделювання раціональної системи управління ВЕ підтвердили ефективність розроблених діагностичних моделей, алгоритмів діагностування та відновлення працездатності для реалізації раціонального управління.

5. Результати обчислювальних експериментів підтвердили принципову можливість діагностування причин дестабілізації ОРУ та можливість відновлення його працездатності за час, що не перевищує час перехідного процесу ОРУ.

### ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна прикладна наукова задача розробки раціональної системи управління ВЕ шляхом формування лінійних діагностичних моделей та алгоритмів діагностування і відновлення його працездатності. На основі поведених теоретичних та експериментальних досліджень отримані такі суттєві результати:

1. Проведено аналіз застосування ВЕ в авіації, напрямів розробки систем управління ВЕ та особливостей його математичного опису. В роботі запропоновано використання раціонального управління як перспективного принципу адаптивного управління ВЕ з метою парирування дестабілізуючих впливів при його безперервному функціонуванні.

2. На основі відомих експериментальних даних розроблена CFD модель ВЕ. Завдяки цій моделі були отримані експериментальні статичні характеристики. Була проведена їх інтервальна лінеаризація, в результаті якої були визначені параметри BE, що залежать від положення регулюючого вентиля і тиску вхідного стисненого повітря.

3. Вдосконалено метод структурно-параметричної ідентифікації за експериментальними частотними характеристиками ВЕ, які відрізняється від відомих використання похідних полінома. Він дозволив отримати математичну модель, придатну для використання у раціональній системі управління.

4. Розроблено структуру раціональної системи управління ВЕ, яка відображає вплив дестабілізацій ОРУ. Структурна схема раціональної системи управління ВЕ дозволила отримати математичні моделі лінійного наближення ОРУ в дискретному просторі станів.

5. Вперше розроблено лінійні діагностичні моделі ВЕ як ОРУ, які відрізняються від відомих використанням структурних та параметричних особливостей нештатного функціонування ВЕ, що дозволило аналітично сформувати алгоритми раціонального управління.

6. Отримав подальший розвиток метод формування алгоритмів діагностування ВЕ як ОРУ, який відрізняється від відомих використанням фрагментарних лінійних діагностичних моделей, що дозволило спростити структуру алгоритмічного забезпечення процесу раціонального управління. Отримані алгоритми діагностування дозволяють виявити факт появи дестабілізації в ОРУ, знайти дестабілізований функціональний елемент, встановить тип дестабілізації та визначити конкретний його вид під час перехідного процесу. Час, що витрачається раціональною системою управління на діагностування аналізованих дестабілізуючих впливів,  $\Delta t_{\rm I}$  знаходиться в межах [1,2; 14,5] с, в залежності від виду дестабілізації.

7. Отримав подальший розвиток метод формування алгоритмів відновлення працездатності функціональних елементів ОРУ, які відрізняються від відомих конкретизацією використання функціональних діагностичних моделей та засобів парирування дестабілізуючих впливів. Час відновлення працездатності функціональних елементів ОРУ  $\Delta t_B$  знаходиться в межах [0,2; 6,2] с, в залежності від виду дестабілізації. Похибка відновлення  $\delta_B$  складає від 0,5 до 7,5 %.

8. Враховуючи, що час перехідного процесу САУ, яка працює в штатному режимі, в середньому складає 27 с, результати обчислювальних експериментів підтвердили принципову можливість діагностування причин дестабілізації ОРУ та можливість відновлення його працездатності за час, який не перевищує час перехідного процесу ОРУ.

9. Додатково отримані експериментальні результати комп'ютерного моделювання одночасного впливу на ОРУ двох різнотипних дестабілізацій. Аналіз результатів показав, що раціональна система управління, що розроблена для однократних відмов, здатна діагностувати і відновлювати працездатність несправного функціонального елемента по черзі.

Усі поставлені в роботі завдання вирішено з отриманням позитивних результатів, мету дослідження досягнуто.

Перспективними задачами подальшого дослідження є:

 розширення дихотомічного дерева діагностування за рахунок аналізу невідомих раніше дестабілізуючих впливів і виявлення нових причиннонаслідкових зв'язків;

– розширення класу діагностичних моделей, що враховують нелінійні та нестаціонарні властивості ВЕ;

– розробка моделей та методів діагностування та відновлення працездатності ВЕ при багаторазових та множинних відмовах.

Вирішення цих задач дозволить покращити адаптивні властивості раціонального управління в умовах невизначеності дестабілізуючих впливів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ranque, G. J. (1933). Experiments on Expansion in a Vortex with Simultaneous Exhaust of Hot Air and Cold Air. *Le Journal de Physique et le Radium*, 4(6), 112-114.

2. Hilsch, R. (1946). Die Expansion von Gasen im Zentrifugalfeld als Kälteprozeß. Zeitschrift für Naturforschung, 1(4), 208-214.

3. Пат. 20060101 США, МПК F25B 9/02, F25B 9/04. Method and apparatus for obtaining from a fluid under pressure two currents of fluids at different temperatures; заявитель и патентообладатель Ranque G. J. – № 1952281; заяв. 06.12.32; опубл. 27.03.34, – 1 с. : іл.

4. Eiamsa-Ard, S., Wongcharee, K., & Promvonge, P. (2010. Experimental investigation on energy separation in a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube: Effect of coling a hot tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(2), 156-162. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.09.013.

5. Abdelghany, S. T., & Kandil, H. A. (2018). Effect of Geometrical Parameters on the Coefficient of Performance of the Ranque-Hilsch Vortex Tube. *Open Access Library Journal*, 05(02), 1-17. DOI: 10.4236/oalib.1104347.

6. Manickam, M., & Prabakaran, J. (2019). CFD analysis on Ranque–Hilsch vortex tube with different cold orifice diameter and cold mass fraction. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 1-14. DOI: 10.1080/01430750.2019.1681292.

7. Manickam, M., & Prabakaran, J. (2019). Effect of number of Nozzle and Cold Mass Fraction on the Performance of Counter Flow Vortex Tube using Computational Fluid Dynamics Analysis. *International Journal of Ambient Energy*, 43(14), 1-26. DOI: 10.1080/01430750.2019.1670254.

8. Kirmaki, V., Kaya, H., & Cebeci, I. (2018). An experimental and exergy analysis of a thermal performance of a counter flow Ranque–Hilsch vortex tube with different nozzle materials. *International Journal of Refrigeration*, 85, 240-254. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.10.003.

9. Green, F. H. (1959). Air Conditioning Device, U. S. Patent No. 2, 892, 316, June 30.

Green, F. H. (1958). Regenerative Vortex Cooling System, U. S. Patent No.
2, 839, 900, June 24.

Green, F. R. (1957). Direct Evaporative Vortex Tube Refrigeration System,
U. S. Patent, March 26.

12. Green, F. H. (1957). Air Conditioning System for Space Ships, U. S. Patent No. 2, 873, 582, Feb. 17.

13. Green, F. H. (1959). Vortex Tube with Flow Control Means, U. S. Patent No. 2, 904, 965, Sept. 22.

14. Schelp, H. R. (1955). Air Cycle Cooling Device Employing Vortex Tube,U. S. Patent No. 2, 720, 091, Oct. 11.

15. Shields, J. T. (1954). Device for Heating and Cooling Vehicles, U. S. Patent No. 2, 669, 101, Febr. 16.

16. Коноваленко, В. А. (2013). Обтрунтування доцільності застосування трубки ранку для охолодження авіаційного обладнання. XV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки», 12.

17. Ruskin, R. E., Schectep, R. M., Dinger, J. E., & Merrill, J. E. (1952). Development of the NRL Axial Flow Vortex Thermometer. *Naval Research Laboratory Report*, 4008, Sept. 4.

18. Халатов, А. А. (1989). Теорія і практика закручених потоків. *Наукова думка*, 192.

19. Халатов, А. А., Авраменко, А. О., і Шевчук, І. В. (2000). Теплообмін та гідродинаміка в полях відцентрових масових сил. Т. З. Закручені потоки. *Інститут технічної теплофізики НАН України*, 476.

20. Beaugendre, E., Lagrandeur, J., Cheayb, M., & Poncet., S. (2021). Integration of vortex tubes in a trigenerative compressed air energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 240(114225). DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114225.

21. Kim, Y., Im, S., & Han, J. (2020). A Study on the Application Possibility of the Vehicle Air Conditioning System Using Vortex Tube. *Energies*, 13(19):5227. DOI: 10.3390/en13195227.

22. Nellis, G. F., & Klein, S. A. (2002). *The Application Of Vortex Tubes to Refrigeration Cycles*. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 537.

23. Weiwei Chen, Zibing Luo, Xinjun Li, Xiaoming Tan, Jingzhou Zhang, Xiande Fang, & Yevhenii Shkvar. (2023). The Potential of Using Vortex Tube to Ameliorate Aircraft Environmental Control System. *AIAA Journal*, 61(5), 2167-2178. DOI: 10.2514/1.J062403.

24. Barbonov, E. O., Biryuk, V. V., Gajnullin, M. N., Sotova, V. A., & Chertykovtsev, P. A. (2017). The hybrid cooling system of onboard infrared detectors on the basis of vortex and thermoelectric effects. *Вестник международной академии холода*, 2, 31–37. DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-31-37.

25. Кулік, А. С., Пасічник, С. И., і Джулгаков, В. Г. (2010). Експериментальне дослідження характеристик вихрового енергороздільника. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 3(70), 65-68.

26. Labay, V. Y., Savchenko, O. O., Zhelykh, V. M., & Kozak, Kh. R. (2019). Mathematical modeling of the heating process in a vortex tube at the gas distribution stations. *Mathematical Modeling and Computing*, 6(2), 311-319. DOI: 10.23939/mmc2019.02.311.

27. James Cartlidge, Nafiz Chowdhury, & Thomas Povey. (2022). Performance characteristics of a divergent vortex tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 186(6):122497, 16. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122497. 28. Uluer, O., Kirmaci, V., & Atas, S. (2009). Using the artificial neural network model for modeling the performance of the counter flow vortex tube. *Expert Systems with Applications*, 36(10), 12256–12263. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.04.061.

29. Khan, Shahzaib Yousuf, Allauddin, Usman, Hasani, Syed Muhammad Fakhir, Khan, Rashid, & Muhammad Arsalan. (2022). *The Effect of Tube Curvature on Temperature Separation Efficiency of Ranque-Hilsch Vortex Tube*. International Petroleum Technology Conference. DOI: 10.2523/IPTC-22414-MS.

30. Mirjalili, M., & Ghorbanian, K. (2021). Numerical investigation of transient thermo-fluid processes in a Ranque-Hilsch vortex tube. *International Journal of Refrigeration*, 131(4), 746–755. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.07.

31. Park, S. Y., Yoon, S. H., Yu, S. S., & Kim, B. J. (2022). Numerical Investigation on the Principle of Energy Separation in the Vortex Tube. *Applied Sciences*, 12(19):1014. DOI: 10.3390/app121910142.

32. Eiamsa-ard, S., Ruengpayungsak, K., Thianpong, C., Pimsarn, M., & Chuwattanakul, V. (2019). Parametric study on thermal enhancement and flow characteristics in a heat exchanger tube installed with protruded baffle bundles. *International Journal of Thermal Sciences*, 145(1):106016. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106016.

33. Кулік, А. С., і Пасічник, С. М. (2010). Ідентифікація математичної моделі вихрового енергороздільника. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 10, 192-196.

34. Кулік, А. С., і Пасічник, С. М. (2015). Використання передаточних функцій дробового порядку для вирішення задачі синтезу системи позиціювання режимів вихрового енергорозділювача. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 9(126), 60-66.

35. Lagrandeur, J., Uzundurukan, A., Mansour, A., Poncet, S., & Benard, P. (2023). On the benefit of integrating vortex tubes in PEMFC system for preheating hydrogen in FCEV technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.246.

36. Гусенцова, Я. А., та ін. (2006). Вихрові пристрої в системах вентиляції. Східноукраїнський нац. ун-т ім. Володимира Даля, Луганськ.

37. Sreeraj, P. V. (2013). Design and Implementation of PID Controller with Lead Compensator for Thermal Process. *International Journal of Computer Applications*, 67(1), 26-31. DOI: 10.5120/11361-6593.

38. Fazel, M. B., Wang, Y., Keenliside, L., & Lee, T.-Y. (2016). A new approach to selective brain cooling by a Ranque-Hilsch vortex tube. *Intensive Care Medicine Experimental*, 4(1). DOI: 10.1186/s40635-016-0102-5.

39. Пасічник, С. М., і Сокол, Д. В. (2018). Вирішення задачі стабілізації температури повітря в кабіні транспортного засобу. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 4, 12-19. DOI: 10.32620/aktt.2018.4.02.

40. Ayten, K. K., Dumlu, A., & Kaleli, A. (2018). Real-time implementation of self-tuning regulator control technique for coupled tank industrial process system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 232(8), 1039–1052. DOI:10.1177/0959651818773179.

41. Maghareh, A., Dyke, S. J., & Silva, C. E. (2020). A Self-tuning Robust Control System for nonlinear real-time hybrid simulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1-21. DOI:10.1002/eqe.3260.

42. Boukens, M., Boukabou, A., & Chadli, M. (2018). A real time self-tuning motion controller for mobile robot systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 1–13. DOI:10.1109/jas.2018.7511216.

43. Сокол, Д. В. (2018). *Переваги використання принципу управління за діагнозом для управління вихровим енергороздільником*. Всеукраїнська науковотехнічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні», 2, 11.

44. Рубанов, В. Г., і Кулік А. С. (1974). Побудова мінімального діагностичного тесту для складного технічного об'єкта. *Системи управління літальних апаратів*, (2), 132-136.

45. Рубанов, В. Г., і Кулік А. С. (1975). Синтез оптимального алгоритму контроля працездатності САУ за її функціонально-логічною моделлю. *Автоматика*, (4), 9-14.

46. Соколов, Ю. М., Рубанов, В. Г., і Кулік, А. С. (1974). Про діагностику безперервних автоматичних систем фільтром виявлення. *Автоматика*, (4), 3-8.

47. Кулік, А. С. (1976). Алгоритм управління резервом при відмовах приладового обладнання в системах. *Радіоелектроніка літальних апаратів*, (8), 106-111.

48. Кулік, А. С., Рубанов, В. Г., і Соколов, Ю. М. (1978). Синтез систем, що пристосовуються до змін параметрів елементів та їх відмов. *Автоматика і телемеханика*, (1), 96-107.

49. Кулік, А. С., і Рубанов, В. Г. (1978). Формально-логічна модель синтезу систем, що пристосовуються до несправностей. *Адаптивні системи* автоматичного управління, (6), 97-101.

50. Кулік, А. С., Сіроджа, І. Б., і Шевченко, А. М. (1989). Побудова діагностичних моделей при розробці діагностичного забезпечення динамічних систем. Ч. 1. *АН УРСР Інститут проблем машинобудування*, (302), 56.

51. Кулік, А. С., Сіроджа, І. Б., і Шевченко, А. М. (1990). Побудова діагностичних моделей при розробці діагностичного забезпечення динамічних систем. Ч. 2. *АН УРСР Інститут проблем машинобудування*, (312), 61.

52. Кулік, А. С. (1987). Діагностованість безперервних систем. Автоматика і телемеханіка, (6), 148-155.

53. Кулік, А. С. (1990). Оцінка діагностованості лінійних систем. Автоматика і телемеханіка, (11), 68-71.

54. Кулік, А. С. (2000). Сигнально-параметричне діагностування систем управління. Держ. аерокосмічний ун-т «ХАІ»; Бізнес Інформ, 260.

55. Кулик, А. С. (1991). Забезпечення відмовостійкості систем управління. *ХАІ*, 90.

56. Черановський, О. Р., Кулік, А. С., і Садовничий, С. М. (1990). Автоматизація діагностування систем управління літаючих моделей при стендових випробуваннях. *ХАІ*, 84.

57. Черановський, О. Р., і Кулік, А. С. (1992). Алгоритмічні і програмні засоби діагностування систем управління літальних апаратів. *ХАІ*, 95.

58. Разинькова, Н. П. (1998). Забезпечення відмовостійкості гіроскопічних вимірювачів кутових положень безпілотних літаків. Дис ... канд. техн. наук. *ХАІ*, 164.

59. Кулік, А. С., Козій, А. П., і Отраднова, Н. П. (1995). Стендове комп'ютерне діагностування блоку гіроскопічних датчиків. *ХАІ*, 63.

60. Кулік, А. С., Козій, А. П., і Отраднова, Н. П. (1995). Стендове комп'ютерне діагностування пневматичних сервоприводів. *XAI*, 90.

61. Кулік, А. С., Піщухіна, О. О., і Фірсов, С. М. (2004). Відмовостійке управління пневматичним сервоприводом. *ХАІ*, 126.

62. Фірсов, С. М. (2004). Забезпечення активної відмовостійкості пневматичного сервопривода безпілотного літального апарата. Дис ... канд. техн. наук. *XAI*, 223.

63. Кулік, А. С., Фірсов, С. М., До Куок Туан, і Златкін, О. Ю. (2008). Діагностування безплатформної інерціальної навігаційної системи безпілотного літального апарата з глибиною до місця відмови. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 1(28), 75-81.

64. Джулгаков, В. Г., Дергачов, К. Ю., Кулік, А. С., Нечипорук, М. В., Пасічник, С. М., і Петренко, В. І. (2023). Раціональне управління працездатністю макетного блока електродвигунів-маховиків. *XAI*, 224.

65. Кулік, А. С. (2017). Раціональне управління працездатністю автономних літальних апаратів. Ч. 1. *Проблеми управління та інформатики*, (3), 25-38.

66. Гавриленко, О. В., Дергачов, К. Ю., Краснов, Л. О., Кулік, А. С., Кулік, І. А., Мартінес Бастідо, Х. П., Немшилов, Ю. О., Паршин, А. П., Пасічник, С. М., Петренко, В. І., і Чухрай, А. Г. (2018). Раціональне управління об'єктами: теорія й застосування. *ХАІ*, 308.

67. Кулік, А. С. (2023). Принцип керування за діагнозом як результат системного застосування фундаментальних принципів керування. *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*, 68(1), 7–22. DOI: 10.34229/1028-0979-2023-1-1.

68. Кулік, А. С., Джулгаков, В. Г., і Пасічник С. М. (2010). Апаратнопрограмний комплекс для дослідження вихрового ефекту. *Вісник ХНТУСГ*, 102, 85-87.

69. Kulik, A. S., Pasichnik, S. N., & Sokol, D. V. (2021). *Investigation of Stationary Processes in Vortex Energy Separator Through Its Computational Fluid Dynamics Model*. Mathematical Modeling and Simulation of Systems : Selected Papers of 16th International Scientific-practical Conference, MODS, 105-114. DOI: 10.1007/978-3-030-89902-8\_8.

70. Свириденко, Н. Ф., Сєнькін, В. С., і Ільїн, Г. І. (2013). Розрахунок та вибір основних режимних та конструктивних параметрів низьконапірної вихрової труби повітряної холодильної установки. *Технічна механіка*, 2, 89-98.

71. Aman Kumar Dhillon, & Syamalendu S. Bandyopadhyay. (2015). *CFD* analysis of straight and flared vortex tube. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 101(1).

72. Сокол, Д. В. (2019). Використання амплітудно-частотних характеристик параметричної ідентифікації математичної моделі об'єкта управління з розподіленими параметрами. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління, 8.

73. Dmytro Sokol. (2019). Using frequency characteristics for structuralparametric identification of a mathematical model of control objects. "Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering" ICTM-2019, 1, 105-108.

74. Сокол, Д. В., і Пявка Є. В. (2020). Використання полінома для структурно-параметричної ідентифікації математичної моделі об'єкта.

Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення, 27-30.

75. Kulik, A., Pasichnik, S., & Sokol, D. (2021). Modeling of physical processes of energy conversion in small-sized vortex energy separator. *Aerospace technic and technology*, 1, 20-30. DOI: 10.32620/aktt.2021.1.03.

76. Кулік, А. С., і Пасічник, С. М. (2012). Ідентифікація математичної моделі вихрового енергороздільника в частотній області. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 7, 192-196.

77. Кулік, А. С. (2016). Елементи теорії раціонального управління об'єктами. *Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»*.

78. Кулік, А. С., і Дибська І. Ю. (2007). Вступ у теорію цифрових систем управління. *Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ»*.

79. Kulik, A., Dergachov, K., Pasichnik, S., & Sokol, D. (2022). Diagnostic models of inoperable states of the vortex energy separator device. *Aerospace technic and technology*, 3(179), 13-29. DOI: 10.32620/aktt.2022.3.02.

80. Brockett, R. W. (2015). Finite dimensional linear systems. Society for Industrial and Applied Mathematics.

81. Kulik, A., Dergachov, K., Pasichnik, S., & Sokol, D. (2022). Rational control of the temperature of vortex energy separator under destabilizing influence. *Radioelectronic and Computer Systems*, 3(103), 47-66. DOI: 10.32620/reks.2022.3.04.

82. Tyagi, S., Goyal, N., Kumar, A., & Ram, M. (2021). Stochastic hybrid energy system modelling with component failure and repair. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. DOI: 10.1007/s13198-021-01129-4.

83. Matlab-Simulink. Retrieved from: https://www.tutorialspoint.com/ matlab\_simulink/matlab\_simulink\_tutorial.pdf

84. Ismail, N., Mat Said, D., Mirsaeidi, S., Ahmad, N., Rosmin, N., Hussin, S. M., Abd Wahid, S. A., Mohd Yassin, Z. I., & Zainal, N. H. (2022). Modeling and Analysis of Simplified PV Module With Various Temperature And Irradiance Inputs Using MATLAB Simulink Algorithm. *ELEKTRIKA- Journal of Electrical Engineering*, 21(3), 28–39. DOI: 10.11113/elektrika.v21n3.365.

85. Zhiyong Wu, Hongping Wang, Yiwen Zhang, & Minglu Ai. (2021). *Robot physical modeling based on matlab/Simulink*. Journal of Physics Conference Series, 2113(1):012076, 7. DOI: 10.1088/1742-6596/2113/1/012076.

86. Sulaymon L. Eshkabilov. (2020). *Practical MATLAB Modeling with Simulink: Programming and Simulating Ordinary and Partial Differential Equations*. Apress Berkeley, CA, 473. DOI: 10.1007/978-1-4842-5799-9.

87. Bhisma Adhikari, Bhisma Adhikari, & Matthew Stephan. (2023). SimIMA: a virtual Simulink intelligent modeling assistant. *Software and Systems Modeling*. DOI: 10.1007/s10270-023-01093-6.

88. Construct and Run a Stateflow Chart. Retrieved from: https://www.mathworks.com/help/stateflow/gs/stateflow-charts.html

89. Gao Yanhui, Xiao Qiangui, Hu Shousong, & Ju Xiao. (2012). Flight Control System Simulation Platform for UAV Based on Integrating Simulink With Stateflow. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 10(5), 985-991. DOI: 10.11591/telkomnika.v10i5.1345.

90. Kuppan Chetty, R. M., Nagarajan, T., Noh Bin Karsiti, & Singaperumal, M. (2012). State Based Modeling and Control of a Multi Robot Systems Using Simulink/Stateflow. *Journal of Applied Sciences*, 12(24), 2494-2502. DOI: 10.3923/jas.2012.2494.2502.

91. Di Zhang, & Jing Zhang. (2022). Modelling and Simulation of Quadrotor Using Model-Based Design. *Highlights in Science Engineering and Technology*, 9, 130-134. DOI: 10.54097/hset.v9i.1730.

92. Liu Bo, & Li Ping. (2010). *A stateflow based simulation of UAV multi-mode flight control*. 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, 3347-3352. DOI: 10.1109/WCICA.2010.5553864.

93. ASTM E29. Standard Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications. Retrieved from: https://www.astm.org/e0029-22.htm.

# ДОДАТОК А. ДОДАТКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МОДЕЛІ РАЦІОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

На рис. А.1 представлені графіки сигналів, що відображають процеси діагностування та відновлення працездатності ВЕ при появі дестабілізуючого впливу у вигляді компенсованої зміни коефіцієнта передачі  $\Delta \kappa_{ox}$  (d<sub>5</sub>).





в)



197





г)







e)





ж)



3)



Рис. А.1. Графіки процесів діагностування та відновлення працездатності ВЕ при компенсованій зміні коефіцієнта передачі (d5)

Час діагностування становить  $\Delta t_{\rm d} = 1,2$  с; час відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\rm B} = 13,3$  с. Загальний час від моменту виникнення дестабілізації до відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\Sigma} = 14,5$  с. Відносна похибка при встановлених значеннях перехідних процесів складає  $\delta_{\rm B} = 2,6$  %.

На рис. А.2 представлені графіки сигналів, що відображають процеси діагностування та відновлення працездатності ВЕ при появі дестабілізуючого впливу у вигляді компенсованого дрейфу робочої точки  $\theta_{ox}$  (d<sub>9</sub>).



в)







г)



д)



e)



200







3)



и)



i)

Рис. А.2. Графіки процесів діагностування та відновлення працездатності ВЕ при компенсованому дрейфі робочої точки (d9)

Час діагностування становить  $\Delta t_{\rm d} = 0,3$  с; час відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\rm B} = 4$  с. Загальний час від моменту виникнення дестабілізації до відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\Sigma} = 4,3$  с. Відносна похибка при встановлених значеннях перехідних процесів складає  $\delta_{\rm B} = 1,2$  %.

На рис. А.3 представлені графіки сигналів, що відображають процеси діагностування та відновлення працездатності ОРУ при одночасній появі дестабілізуючих впливів у вигляді компенсованої зміни коефіцієнта передачі привода  $\Delta \kappa_{np}$  (d<sub>1</sub>) та компенсованого дрейфу нуля датчика температури холодного потоку повітря  $u_{dx0}$  (d<sub>15</sub>).









г)





д)

203





c)



ж)



3)



204



i)



ï)



й)



к)



л)

Рис. А.3. Графіки процесів діагностування та відновлення працездатності ОРУ при компенсованій зміні коефіцієнта передачі привода (d<sub>1</sub>) та компенсованому дрейфі нуля датчика температури холодного потоку повітря (d<sub>15</sub>)

Час діагностування привода становить  $\Delta t_{\text{Д1}} = 0,8$  с; час відновлення працездатності привода становить  $\Delta t_{\text{B1}} = 8,5$  с. Загальний час від моменту виникнення дестабілізацій до відновлення привода становить  $\Delta t_{\Sigma1} = 9,3$  с. Час діагностування датчика температури холодного потоку повітря становить  $\Delta t_{\text{Д2}} = 7,8$  с; час відновлення працездатності датчика становить  $\Delta t_{\text{B2}} = 0,3$  с. Загальний час від моменту виникнення дестабілізацій до відновлення датчика становить  $\Delta t_{\Sigma2} = 8,1$  с. Загальний час від моменту виникнення дестабілізацій до повного відновлення ОРУ становить  $\Delta t_{\Sigma} = 17,4$  с. Відносна похибка при встановлених значеннях перехідних процесів складає  $\delta_{\text{B}} = 2,6$  %.

## ДОДАТОК Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ



### ЗАТВЕРДЖУЮ Проректор з наукової роботи Національного арокосмічного університету ім. 4° С. Жуковського «Харкіновані аріалійниц иститут» при Зіробитор Водонцина ПАВЛІКОВ

#### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів дисертаційної роботи Сокола Дмитра Вадимовича, виконаної на здобуття наукового ступеня доктора філософії при виконанні науково-дослідної роботи

Комісія у складі голови – завідувача кафедри систем управління літальних апаратів, к.т.н., с.н.с. Костянтина ДЕРГАЧОВА, членів доцента кафедри систем управління літальних апаратів, к.т.н. Сергія ПАСІЧНИКА та доцента кафедри систем управління літальних апаратів, к.т.н. Юрія НЕМШИЛОВА встановила, що результати наукових досліджень Сокола Дмитра Вадимовича, а саме:

 лінійні діагностичні моделі вихрового енергороздільника як об'єкта раціонального управління, що дають можливість аналітично формувати алгоритми раціонального управління;

 метод структурно-параметричної ідентифікації за експериментальними частотними характеристиками керованих об'єктів, що дозволяє підвищити адекватність лінійного математичного опису;

 метод формування алгоритмів діагностування вихрового енергороздільника як об'єкта раціонального управління, що дозволяє спростити структуру алгоритмічного забезпечення процесу раціонального управління;

 метод формування алгоритмів відновлення працездатності функціональних елементів об'єкта раціонального управління, що дозволяє розробляти ефективні алгоритми відновлення працездатності

було впроваджено у науково-дослідній роботі, що виконувалася в рамках робочого часу викладачів кафедри систем управління літальних апаратів, у вигляді теоретичних положень, використаних при виконанні НДР:

Раціональне управління функціонуванням технічних систем з невизначеною динамікою (Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «XAI», ДР №0121U108867, 01.01.2021 – 31.12.2023 рр.).

Це дозволило підвищити якість виконання НДР щодо розроблення та впровадження сучасних моделей та методів розроблення систем управління на основі принципу управління за діагнозом.

Голова комісії:

Члени комісії:

Костянтин ДЕРГАЧОВ Сергій ПАСІЧНИК Юрій НЕМШИЛОВ

29 09 2023 p.

ЗАТВЕРДЖУЮ Генеральний директор ДНВП "Об'єднання Комунар" Яременко А.С. 2023 p.

Про впровадження результатів дисертаційної роботи «Моделі та методи раціонального управління працездатністю вихрового енергороздільника», яка виконана у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут" Соколом Дмитром Вадимовичем

Комісія у складі :Голови – Головний інженер Голован О.П. та членів комісії – Головній технолог Панца В.Л., Головний фахівець з АСК Без'язичний А.М. склала дійсний акт, який полягає в тому, що при виконанні на ДНВП "Об'єднання Комунар" наукових досліджень зі створення системи інтелектуального керування ударостійкого безпілотного літального апарату (БПЛА) були використані результати дисертаційної роботи Сокола Дмитра Вадимовича, а саме:

 методи моделювання дестабілізуючих впливів на функціювання об'єкта управління, який представлений лінійними дискретними рівняннями;

– діагностичні функціональні моделі, як новий клас математичних моделей, що відображають особливості позаштатних ситуацій в автономних об'єктах управління, що дозволило реалізувати: методи моделювання номінального режиму польоту, польоту з урахуванням збурень та позаштатних режимів польоту БПЛА; методику формування діагностичних моделей на прикладі поздовжнього не коливального руху ударостійкого літального апарату. Отримані в межах договору № 301-7/2022 від 01.09.2022 результати науково-дослідної роботи увійшли до звіту з НДР «Розробка системи інтелектуального керування ударостійкого безпілотного літального апарату».

Голова комісії:

024

Олександр Голован

Члени комісії:

Головний технолог

Головний інженер

Головний фахівець з АСК

Віктор Панца

Андрій Без'язичний

ЗАТВЕРДЖУЮ Директор ТОВ «ЕСлижинірінг» 27 вересня АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії Сокола Дмитра Вадимовича на тему «Моделі та методи раціонального управління працездатністю вихрового енергороздільника»

Науково-технічна комісія у складі: Чайка І.В., Ганжа Е.П., Сільченко О.В. встановила, що результати наукових досліджень Сокола Дмитра Вадимовича, а саме:

 метод структурно-параметричної ідентифікації за експериментальними частотними характеристиками керованих об'єктів;

 метод діагностування за допомогою дихотомічних дерев, який допомогає формалізувати процес пошуку дефектів та несправностей об'єкту діагностування були використані у ТОВ «ЕС Інжинірінг» при проектуванні та пусконалагоджувальних роботах при виконанні проекту «Холодопостачання камери зберігання морозива об'ємом 2300 м куб». Це дозволило скоротити строки виготовлення та монтажу холодильного комплексу зберігання заморожених продуктів «Рудь», місто Житомир.

Голова комісії, кандидат технічних наук:

Члени комісії:

Ганжа Е.П. Чайка І.В. Сільченко О.В.

27 вересня 2023 р.