

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**СОКОЛА Дмитра Вадимовича**

на тему "Моделі та методи раціонального управління працездатністю вихрового енергороздільника", представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації за спеціальністю 173 Авіоніка

### **Актуальність теми.**

На сьогоднішній день важливим напрямом енергетичної та екологічної безпеки суспільства є використання нетрадиційних технологій перетворення енергії. Вихровий енергороздільник (ВЕ), який базується на ефекті кінетичного поділу стисненого газу на холодну та гарячу фракції у вихорі – є одним з найуспішніших застосувань такої технології на практиці. Таким пристроєм притаманні економічність та екологічність експлуатації, простота та надійність конструкції, невеликі габаритно-масові параметри. Вони використовуються для регулювання температури конструкцій або обладнання, причому як у бік нагріву, так і у бік охолодження. Одним із поширених сфер застосування ВЕ є авіаційна техніка та авіоніка. Відомі сьогодні методи вдосконалення ВЕ спрямовані здебільшого на покращення його конструкції. Але такі методи не спроможні забезпечити інваріантність роботи ВЕ в умовах внутрішніх та зовнішніх збурень, таких, як параметричні відмови елементів або неконтрольована зміна параметрів вхідного повітря. Це приводить до не стабільності вихідних параметрів ВЕ або навіть до втрати працездатності.

В дисертації вказана проблема розв'язується за допомогою раціонального управління, концепція якого вже багато років розвивається у Харківському авіаційному інституті. Такий підхід забезпечуватиме відмовостійке функціонування ВЕ в умовах дестабілізуючих впливів зовнішнього та внутрішнього походження за рахунок використання замкненої схеми управління з вдосконаленим методом обробки інформації. Таким чином, науково-практична проблема забезпечення працездатності ВЕ з оглядом на їх використання у критичних областях техніки є своєчасною та безумовно актуальною.

Тема пов'язана із виконанням на кафедрі систем управління літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського "ХАІ" науково-дослідних робіт за держбюджетною темою "Раціональне управління функціонуванням технічних систем з невизначеною динамікою" (ДР №0121U108867, 2021–2023 рр.).

**Оцінка обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.**

В роботі застосовані наступні методи: математичного та комп'ютерного моделювання; структурної та параметричної ідентифікації; диференціального числення; частотних характеристик; теорії автоматичного управління,

дискретної математики та чисельні методи. Розробка базується на реальній конструкції ВЕ. При викладанні ефектів, що спостерігаються у ВЕ, дається адекватне фізичне пояснення. Математичні моделі та залежності, що використовуються, відповідають або загальноприйнятим, або коректно отримані в роботі самостійно. Висновки та рекомендації базуються на результатах моделювання та не виходять за межі прийнятих припущень та обмежень. Таким чином, положення, висновки і рекомендації, наведені в дисертаційній роботі Сокола Дмитра Вадимовича, в достатній мірі обґрунтовані як з наукового, так і з технічного поглядів.

#### **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджується коректністю використання методів дослідження, результатами чисельного моделювання та збігом результатів із загальнотеоретичним уявленням.

Підтвердженням достовірності є також позитивний результат впровадження матеріалів дисертації у науково-дослідну роботу ДНВП "Об'єднання Комунар" та практичну роботу ТОВ "ЕС Інжиніринг".

**До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

1) вперше розроблені лінійні діагностичні моделі ВЕ як об'єкта раціонального управління, що відрізняються від відомих використанням структурних і параметричних особливостей нештатного функціонування ВЕ, що дало можливість аналітично сформулювати алгоритми раціонального управління;

2) вдосконалено метод структурно-параметричної ідентифікації за експериментальними частотними характеристиками, що на відміну від відомих використовує апроксимаційний поліном та його похідні, що дозволяє підвищити адекватність лінійного математичного опису;

3) отримав подальший розвиток метод формування алгоритмів діагностування ВЕ як об'єкта раціонального управління, що відрізняється від відомих використанням кусково-лінійних діагностичних моделей, що дозволило спростити структуру алгоритмічного забезпечення раціонального управління без втрати якості;

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

#### **Практична цінність отриманих результатів.**

1) Використання принципу управління за діагнозом дозволяє застосовувати системи управління вихровим енергороздільником в умовах невизначеності параметрів останнього та суттєвої залежності потоку газу від зовнішніх умов функціонування. Це підвищує відмовостійкість ВЕ та забезпечуватиме його працездатність у нестабільних умовах функціонування.

2) Розроблені моделі та методи є науково-методичною основою для забезпечення якісного відновлення працездатності вихрового енергороздільника і дозволяють забезпечити безперервну роботу системи автоматичного управління вихровим енергороздільником.

3) Практично значущим є також впровадження результатів дисертації у навчальний процес, науково-дослідну та практичну діяльність кафедри та зовнішніх установ.

### **Зміст та оформлення дисертаційної роботи.**

Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 210 сторінок, із них 165 сторінок основного тексту.

У *вступі* із посиланнями на досягнення попередніх вчених та фахівців обговорюється вибір теми дослідження, обґрунтовується її актуальність, формулюються мета та задачі, визначаються об'єкт, предмет та методи дослідження, декларується наукова новизна та практичне значення результатів, визначається особистий внесок автора, приводяться відомості стосовно публікацій та апробації результатів, дається загальна структура дисертації.

*Перший розділ* присвячено опису вихрового енергороздільника. Проведено аналіз фізичних засад його функціонування, принципу роботи та принципових схем і конструктивних особливостей. Окремо розглянуті аспекти використання ВЕ в авіаційній техніці. Розкрито специфіку наукових досліджень у цій галузі та основних напрямів вдосконалення ВЕ. На підставі проведеного аналізу виявлено основні недоліки та обмеженість існуючих підходів до підвищення ефективності ВЕ, пов'язані із складністю математичної моделі фізичного процесу вихрового розподілу та невизначеністю можливих дестабілізуючих факторів зовнішнього та внутрішнього походження. Серед найважливіших висновків – це необхідність використання в цих умовах концепції раціонального управління. Врешті решт визначено та структуровано задачі дослідження, виходячи з необхідності побудови раціональної системи управління.

У *другому розділі* описані графічна, фізична моделі ВЕ та його принцип дії як об'єкта автоматичного управління. На основі літературних джерел наведені основні характеристики між вхідними та вихідними параметрами ВЕ, які продемонстрували суттєву нелінійність досліджуваного процесу. Для отримання вихідних даних, необхідних для подальшого дослідження, використано стандартну обчислювальну модель Computational Fluid Dynamics (CFD) у середовищі SolidWorks, для валідації якої використані експериментальні дані з літературних джерел. Розроблені структурні схеми системи раціонального управління ВЕ, визначено склад датчиків інформації та виконавчих пристроїв, побудовані математичні моделі для них. Особливої уваги приділено моделі ВЕ. З використанням наявних експериментальних частотних та статичних характеристик проведено структурну та параметричну

ідентифікацію лінеаризованої моделі ВЕ. Даний розділ містить два перших пункти наукової новизни, сформульовані вище.

Особливістю раціонального управління є використання підсистеми поточної діагностики стану об'єкта та системи у цілому з метою парирування збурень або відновлення працездатності пристрою. Питанням адаптації раціонального управління до ВЕ присвячено *третій розділ*. В ньому дається розгалужений математичний опис ВЕ та системи управління, структурна схема номінального та нештатних режимів роботи ВЕ. Дається класифікація внутрішніх дестабілізуючих факторів та виводяться основні співвідношення для оцінки їх величин. Таким чином, формуються алгоритмічні основи для виявлення дестабілізації ВЕ у ході функціонування, пошуку місця, встановлення типу та виду дестабілізації. Розділ закінчується узагальненням алгоритму діагностування у вигляді дихотомічного дерева. Розділ містить третій пункт наукової новизни.

У *четвертому розділі* проведено аналіз можливих методів відновлення працездатності об'єктів раціонального управління взагалі та розглянуто особливості для ВЕ з використанням розроблених діагностичних моделей. Розвинуто метод формування алгоритмів відновлення елементів ВЕ та розроблено алгоритми відновлення працездатності при компенсованих та некомпенсованих видах дестабілізації. Сформовано нові алгоритми відновлення вимірювань датчиків температури при різних видах дестабілізації. Розділ містить четвертий пункт наукової новизни.

*П'ятий розділ* містить матеріали апробації розроблених алгоритмів раціонального управління шляхом комп'ютерного моделювання з використанням середовища Simulink. Описана структурна схема моделюючої програми та параметри її налаштування та узгодження з алгоритмами діагностування. Для перевірки ефективності розробленої методології було проведено окремі експерименти з додаванням певних дестабілізуючих впливів. Для кожного випадку визначався проміжок час, за який було діагностовано вплив, час та точність відновлення. Розділ містить наочні графіки усіх основних параметрів системи, графічні результати докладно пояснюються. Результати переконують у доцільності використання раціонального управління ВЕ для забезпечення його функціонування як у штатних, так і у нештатних режимах.

У *висновках* усієї роботи розгорнуто формулюються основні результати дисертації, висновки та рекомендації.

*Додатки* містять додаткові матеріали моделювання та акти впровадження.

На підставі аналізу основного змісту роботи, з урахуванням повноти та закінченості роботи та логічності проведення та викладання усіх етапів дослідження можна стверджувати про високий теоретичний та практичний рівень виконання наукового завдання та високий рівень оволодіння автором методологією наукової діяльності.

Дисертаційна робота гарно оформлена, написана у сучасному науковому стилі та відповідає вимогам наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 "Про затвердження вимог до оформлення дисертації".

#### **Академічна доброчесність**

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено. Використання в тексті результатів інших вчених супроводжується відповідними посиланнями, посилання на літературні джерела коректні. Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

#### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Основні результати дисертації опубліковано в 11 працях, у тому числі у 4 статтях в наукових фахових виданнях; 1 тези доповідей на конференції, які включені до наукометричної бази Scopus; 1 стаття у журналі, яка включена до наукометричної бази Scopus. Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві, зазначена у дисертаційній роботі.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 "Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії", затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

#### **Зауваження щодо змісту дисертаційної роботи.**

1. Автор не навів відомості про можливість використання розширеного фільтру Калмана в задачах діагностування довготривалих параметричних відмов ВЕ. Такий метод успішно застосовується, наприклад, для оперативної оцінки дрейфу гіроскопів та зсуву нулів акселерометрів в інерціально-супутникових навігаційних системах.

2. У розділі 2 найкраща передавальна функція для ВЕ визначена як інерційна ланка першого порядку (2.7), для якої параметри отримані вдосконаленням автором оригінальним методом. На жаль, автор не обґрунтував, чому він не скористався більш очевидним методом найменших квадратів та не зробив це шляхом чисельної мінімізації суми квадратів нев'язок,

$$\min_{k_0, T_0} \sum_{j=1}^8 \left( k_0^2 - 10^{0.1 \cdot L_j} \cdot (1 + T_0^2 \cdot \omega_j^2) \right)^2$$
, де  $(\omega_j, L_j)$  - експериментальні точки ЛАХ.

3. Стосується вихідних математичних моделей. У розділі 3 не зрозуміло, звідки у формулі (3.5) з'явився доданок  $A \cdot \tilde{x}_0$  та куди подівся доданок  $A \cdot \Delta x(k)$  у формулі (3.7).



4. Введення в алгоритм відновлення працездатності гістерезисного реле (рис.4.2) може привести до небажаних автоколивань в процесах діагностування та відновлення. Чи передбачені в алгоритмах заходи до їх придушення?

5. В розділі 5 не зрозуміло, наскільки відрізняються моделі БЕ та елементів системи управління, закладені в імітатор "реального пристрою", від моделей, які використані в алгоритмах раціонального управління.

6. В графічних результатах, зображених на рис.5.10 а)-в) є певна суперечливість, пов'язана з поведінкою зображених змінних та очевидним впливом одна на одну.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Дисертація є актуальною і має високу наукову цінність та практичну значущість.

#### **Висновки.**

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-практичну задачу, яка полягає у забезпечення працездатності вихрового енергороздільника в умовах дестабілізуючих факторів внутрішнього та зовнішнього походження.

Подана дисертаційна робота "Моделі та методи раціонального управління працездатністю вихрового енергороздільника" Сокола Д.В. відповідає спеціальності 173 - авіоніка, відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 "Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії", затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022р. №44, а здобувач Сокол Дмитро Вадимович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 173 - авіоніка.

Доктор техн. наук, доцент,  
професор кафедри комп'ютерного  
моделювання процесів та систем  
Національного технічного університету  
"Харківський політехнічний інститут"

Валерій УСПЕНСЬКИЙ

Підпис *Д.В. Сокол*  
ЗАСВІДЧУЮ:  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"  
*[Підпис]*  
" " 2024 р.



ЗАПЕЧЕВ. Ю. І.