

## **Рішення разової спеціалізованої вченої ради про присудження ступеня доктора філософії**

Разова спеціалізована вчена рада Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації на підставі публічного захисту дисертації на тему «Моделі та методи раціонального управління працездатністю вихрового енергороздільника» за спеціальністю 173 Авіоніка "18" січня 2024 року.

Сокол Дмитро Вадимович 1995 року народження, громадянин України, освіта вища: закінчив у 2018 році Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» за спеціальністю Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

У 2018 вступив до аспірантури за спеціальністю 173 Авіоніка, за освітньої програмою Системи автономної навігації та адаптивного управління літальних апаратів. Завершив навчання у 2022 році.

Працює асистентом в Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Міністерство освіти і науки України, м. Харків з 2018 року до цього часу.

Дисертацію виконано у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Міністерство освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник, Кулік Анатолій Степанович, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор кафедри систем управління літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Здобувач має 6 наукових публікацій за темою дисертації, з них 4 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті – у періодичному науковому виданні, проіндексованому у базах даних Scopus:

1. 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/akt.2018.4.02.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Kulik, A., Dergachov, K., Pasichnik, S., & Sokol, D. (2023). Rational control by temperature in vortex energy separator under destabilizing effects. Aviation, 27(4), 234–241. DOI: 10.3846/aviation.2023.20229.

У дискусії взяли участь голова і члени разової спеціалізованої вченої ради:

1. Голова разової спеціалізованої вченої ради – Єпіфанов С. В., д.т.н., проф., зав. каф. конструкції авіаційних двигунів, заслужений діяч науки і техніки України.

Зауваги:

– не зрозуміло, якими параметрами характеризується ефективність роботи вихрових енергороздільників.

– явним чином у роботі не висвітлено вплив запропонованих моделей та методів на ефективність роботи вихрового енергороздільника.

– у роботі вживається термін «працездатність». В теорії надійності визначено, що працездатний стан об'єкта характеризується його здатністю виконувати усі потрібні функції, а справний стан об'єкта характеризує відповідність об'єкта всім вимогам нормативно-технічної та (або) конструкторської, проектної документації і здатний виконувати усі задані функції.

2. Офіційний опонент – Блінцов В. С., д.т.н., проф., проф. каф. електроустаткування та автоматики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат державної премії України в галузі науки і техніки.

Зауваги (з відгуку, що додається):

– у розділі 2 розробка CFD-моделі аргументована отриманням математичної моделі вихрового енергороздільника, наближеної до об'єкта-

оригіналу. Проте відсутнє порівняння характеристик CFD-моделі (рис. 2.14, 2.15) та характеристик, отриманих з натурального експерименту (рис. 2.3);

– у роботі відсутнє зіставлення фізичних джерел дестабілізації, які проаналізовані в розділі 1 (стор. 54), та прямих ознак дестабілізації (зміна коефіцієнтів передачі, дрейфи нуля та робочої точки, зміна сталої часу). Заміщення поняття дестабілізації її ознакою перешкоджає цілісному сприйманню задачі діагностування;

– на рис. 1.5 (стор. 31, 32) не зрозумілий параметр Radius (m), відсутній опис цього параметра у тексті, а також використане невдале словосполучення «радіальна температура»;

– відсутня розшифровка позначень у формулах у першому розділі (1.5) – (1.10);

– у роботі зустрічаються недоліки в поданому матеріалі: рівняння (1.4) наведено з явними помилками, на рис. 1.2 б) двічі повторюється «Холодний потік», на стор. 31 – «...конусного вентиля (1, 2 і 3 мм)...», у системі рівнянь (2.5) пропущене позначення оціночного значення « $\wedge$ » для сталих часу, в системах рівнянь (3.5) та (3.7) пропущений нижній індекс для вектора управління –  $u(k)$  замість  $u_y(k)$  тощо.

3. Офіційний опонент – Успенський В. Б., д.т.н., доц., проф. каф. комп'ютерного моделювання процесів і систем Національного технічного університету «ХПІ».

Зауваги (з відгуку, що додається):

– 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;

– у розділі 2 найкраща передавальна функція для ВЕ визначена як інерційна ланка першого порядку (2.7), для якої параметри отримані вдосконаленим 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;

– 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);

– введення в алгоритм відновлення працездатності гістерезисного реле (рис. 4.2) може привести до небажаних автоколивань у процесах діагностування та відновлення;

– у розділі 5 не зрозуміло, наскільки відрізняються моделі ВЕ та елементів системи управління, закладені в імітатор «реального пристрою», від моделей, які використані в алгоритмах раціонального управління;

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

4. Рецензент – Фесенко Г. В., д.т.н., проф., проф. каф. комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки.

Зауваги (з рецензії, що додається):

– у роботі відсутнє порівняння запропонованого раціонального управління з іншими видами адаптивного управління;

– не пояснюється врахування помилок першого та другого роду на етапі діагностування працездатності;

– у розділі 2 відсутня аргументація вибору математичної моделі вихрового енергороздільника з усіх наведених варіантів (рис. 2.18, 2.19) саме аперіодичної ланки першого порядку;

– наведено, проте ніяк не застосовуються дані з графіка розподілу температури повітря вздовж камери енергетичного поділу (рис. 2.9);

– у якості типів дестабілізації в функціонуванні вихрового енергороздільника розглядаються зміни параметрів лише в математичній моделі каналу холодного потоку повітря, аргументуючи це значимістю ролі охолодження перед нагріванням. Виходячи з принципу роботи вихрового енергороздільника, параметри холодного та гарячого потоків взаємопов'язані, тож таке допущення виправдане. Проте не зрозуміло, яким чином був реалізований цей взаємозв'язок, адже, наприклад, величина зміни коефіцієнта передачі  $\Delta k_{ox}$  не дорівнює величині зміни коефіцієнта передачі  $\Delta k_{ог}$ ;

– для аналізу чи аргументації наукових досліджень здобувач посилається на відносно застарілі публікації та патенти.

5. Рецензент – Зеленський Р. Л., к.т.н., доц., доц. каф. конструкції авіаційних двигунів.

Зауваги (з рецензії, що додається):

– є незначні неточності в формулах;

– із роботи не зрозуміло, які саме дестабілізуючі впливи викликають зміну того чи іншого параметра, що розглядаються у роботі;

– в роботі розглядаються випадки позаштатних ситуацій у вигляді змін параметрів математичної моделі вихрового енергороздільника за каналом холодного потоку повітря, але не проаналізовані зміни параметрів за каналом

гарячого потоку повітря. У роботі це рішення пояснюється безпосереднім взаємозв'язком каналів, проте така реалізація ніяк не описується у розділі 5;

– у роботі раціональне управління представлено як вид адаптивного управління, проте не проаналізовані інші його види;

– не зрозуміла аргументація вибору значення кроку дискретизації у 100 мс у розділі 5.

На зауваги Здобувач дав такі відповіді:

1. Відповіді на зауваги голови разової спеціальної вченої ради Сергія ЄПІФАНОВА:

– Виходячи з проведено аналізу літератури, в залежності від поставленої задачі виділяють два критерії ефективності вихрових енергороздільників: діапазон температури вихідних потоків повітря та стабільна робота (підтримання) параметрів вихідних потоків повітря. В дисертаційній роботі був розглянутий другий варіант – підтримання функціонування об'єкта раціонального управління в межах номінального режиму роботи за рахунок парирування дестабілізуючих впливів.

– Аналіз ефективності роботи раціональної системи управління працездатністю вихрового енергороздільника проводився у розділі 5. Кількісна оцінка ефективності представлена у вигляді часу, витраченого системою на діагностування та відновлення працездатності, та відносної похибки відновлення працездатності. Результати цього аналізу також висвітлено у загальних висновках до роботи як порівняння загального часу на діагностування та відновлення працездатності із часом перехідного процесу об'єкта автоматичного управління.

– У роботі вживається термін «працездатність». У теорії надійності визначено, що працездатний стан об'єкта характеризується його здатністю виконувати всі потрібні функції, а справний стан об'єкта характеризує відповідність об'єкта всім вимогам нормативно-технічної та (або) конструкторської, проектної документації та здатний виконувати всі задані функції.

– У роботі не було спроби ввести новий термін або поняття. Використовувався термін теорії раціонального управління «працездатність» як стан системи автоматичного управління, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам технічного завдання.

2. Відповіді на зауваги офіційного опонента Володимира БЛІНЦОВА:

– CFD-модель не використовувалась для її кількісного аналізу, основним завданням на цьому етапі було візуальне підтвердження гіпотези про вихрові процеси всередині вихрового енергороздільника. Проте погоджусь із тим, що це порівняння відсутнє та доцільно було б відобразити порівняння у роботі.

– Ідея раціонального управління не є новаторською. За цей час вже було проведено багато наукових досліджень та опублікована значна кількість наукових праць, у яких була доведена недоцільність аналізу нескінченної множини факторів, що так чи інакше можуть впливати на параметри математичної моделі об'єкта раціонального управління (в дисертаційній роботі наведені відповідні посилання).

– Згідно оригінального тексту, параметр  $R_{\text{adius}}$  визначає радіус кола на уявній площині поперечного перерізу вихрового енергороздільника. Оскільки діафрагма має певний діаметр і температура потоку повітря неоднорідна, то й вона відрізняється з віддаленням/наближенням до повздовжньої осі вихрового енергороздільника.

– Погоджусь з рештою зауваг.

### 3. Відповіді на зауваги офіційного опонента Валерія УСПЕНСЬКОГО:

– Принцип управління за діагнозом не був розроблений вперше в представлений дисертаційній роботі. Процес формулювання цього принципу за минулі десятиліття вирішував питання порівняльного аналізу з фільтром Калмана, розширеним фільтром Калмана тощо. В дисертаційній роботі використаний принцип управління за діагнозом був визначений як інструмент для діагностування та відновлення працездатності в умовах обмеження часу. Принциповою задачею було діагностування та відновлення працездатності об'єкта раціонального управління за час, що не перевищує час його перехідного процесу.

– По-перше, у роботі отримана структура математичної моделі не визначається як «найкраща», а обрана як найпростіший варіант серед отриманих, що підходить для подальшого його використання. По-друге, метод найменших квадратів потребує попереднього визначення структури математичної моделі, у той час коли запропонований у роботі метод сам надає варіанти структури, які з тією чи іншою похибкою відповідають вихідній нелінійній характеристиці.

– За допомогою вищезгаданого доданка у формулі (3.5) проводилась спроба врахувати вплив дрейфу нуля на поведінку об'єкта раціонального управління, а також прирівняти до нуля початкові умови. Мушу погодитись, що формула (3.5) була представлена із помилкою, що безпосередньо вплинуло на формулу (3.7). Ця частина буде окремо проаналізована у майбутніх дослідженнях.

– Гістерезисне реле (рис. 4.2) було введено з метою визначення однозначного моменту вирішення задачі відновлення працездатності. Різниця між похибкою відновлення  $\delta_B$  та допуском на відхилення  $\delta_0$  визначає ступінь довіри до алгоритму відновлення. В той час введення гістерезисного реле не призвело до автоколивань під час комп'ютерного експерименту, тож і заходи для їх придушення не розглядались.

- Погоджуюсь: порівняння не було проведене.
- Погоджуюсь: допущена розбіжність між сигналом та його формою на рис. 5.10 в). Сам графік ілюструє факт появи дестабілізації у вигляді логічного сигналу, проте після певних оновлень було вирішено відобразити саме дрейф нуля та його зміну у вигляді лінійно спадаючої функції, але сам графік лишився без змін.

#### 4. Відповіді на зауваги рецензента Германа ФЕСЕНКА:

– Задачі дисертаційної роботи не передбачали розробку методу раціонального управління. Аналіз використання цього методу проводився раніше у публікаціях наукового керівника Куліка А. С. (посилання на деякі з них наведено у роботі), в яких порівнювались різні методи класу адаптивних систем управління. Тож задача цього порівняння виходить за рамки дисертаційної роботи.

– Мушу погодитись із тим, що ця інформація не представлена у явному вигляді. Врахування цих помилок було описане під час доповіді на слайді 17.

– Погоджусь із заувагою. Вважаю, що доцільним було б провести порівняльний аналіз отриманої математичної моделі із вихідними даними.

– Наведений графік підтверджує першу частину гіпотези про процес вихрового поділу, а також додатково використовувався для отримання статичних характеристик вихрового енергороздільника.

– Основою метою роботи було довести принципову можливість роботи раціональної системи управління. Аналіз дестабілізацій вихрового енергороздільника був проведений на прикладі каналу холодного потоку повітря як основного каналу при використанні вихрового енергороздільника. Взаємозв'язок коефіцієнтів було змодельовано за інформацією про статичні та динамічні характеристики вихрового енергороздільника. Непрямим шляхом зв'язок зміни цих коефіцієнтів підтверджується результатами комп'ютерного моделювання.

– Частина джерел використовувалась для посилання на класичні канонічні джерела, частина – з метою підкреслити шлях розвитку моделей та методів (що стосується опису принципу управління за діагнозом). Проте погоджусь із тим, що певні публікації та патенти можна було б замінити на сучасні альтернативні джерела.

#### 5. Відповіді на зауваги рецензента Романа ЗЕЛЕНСЬКОГО:

– У рамках дисертаційної роботи не розглядався аналіз фізичних джерел дестабілізації, бо за рахунок накопиченого досвіду їх нескінченна множина була зведена до змін у параметрах та структурі математичної моделі об'єкта раціонального управління.

– При аналізі працездатності вихрового енергороздільника основною задачею було довести роботу алгоритмів діагностування та відновлення його працездатності саме для каналу холодного потоку повітря, що, виходячи з аналізу використання пристрою, є основним при його експлуатації. Непрямим шляхом зв'язок зміни цих коефіцієнтів підтверджується результатами комп'ютерного моделювання.

– У роботі не ставилась задача застосувати до вихрового енергороздільника та порівняти різні види адаптивного управління. Проводився аналіз із раніше запропонованими принципами управління, і серед варіантів був представлений варіант системи управління вихровим енергороздільником із використанням нейронних мереж. Якщо віднести її до класу адаптивних систем, то аналіз цієї роботи представлено у розділі 1.

– Крок дискретизації був обраний за допомогою теореми Котельникова-Шеннона, а також задля врахування коефіцієнту довіри та помилок першого та другого роду на етапі діагностування працездатності. На жаль, ця частина не була висвітлена у роботі.

– Погоджуюсь із рештою зауваг.

Члени разової ради визнали відповіді задовільними.

Результати голосування: "За" 5 членів ради, "Проти" 0 членів ради.

На підставі результатів голосування разова спеціалізована вчена рада присуджує Соколу Дмитро Вадимовичу ступінь доктора філософії з галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації за спеціальністю 173 Авіоніка.

Голова разової спеціалізованої вченої ради  Сергій ЄПІФАНОВ

*Згідно Сергія Єпіфанова  
завідую*

*Ученій секретар  
університету  
Верішча Богусарєва*



М.П. «» 2024 року