

УДК 681.5.004.4`4

doi: 10.32620/aktt.2025.4sup2.20

С. Р. ВЯЛОВ

АТ «Елемент», Одеса, Україна

Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ КРИТИЧНИХ СЦЕНАРІЇВ ЗАПУСКУ ТА ЗУПИНКИ ГТД ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ЗАХИСТІВ РЕГУЛЯТОРА

У статті представлено методологію імітаційного моделювання критичних сценаріїв запуску та зупини газотурбінного двигуна ТВ3-117 для випробування алгоритмів захисту електронного регулятора. Використання стенд-імітаційного комплексу з інтегрованою математичною моделлю двигуна дозволяє відтворювати динаміку роботи агрегатів у реальному масштабі часу без залучення реального обладнання. На основі такої моделі розроблено автоматизовану утиліту перевірок, що забезпечує побудову сценаріїв запуску, зупини та аварійних впливів у вигляді логічних блок-схем. Алгоритми утиліти дозволяють гнучко налаштовувати послідовності дій, задавати значення контрольованих параметрів, створювати аварійні ситуації та оцінювати реакцію системи керування в широкому діапазоні умов. Проведено імітацію штатних і критичних режимів, зокрема перевищення температури, обертів, затримки пуску, обриву каналів сенсорів, несправностей зв'язку та аварійного вимкнення двигуна. Здійснено тестування логіки захисту регулятора, зокрема обмеження обертів, температури, перехід у надзвичайні режими при відмові одного двигуна, відключення живлення, втрати зв'язку між модулями. Для кожного випадку зафіксовано реакції моделі, що дозволило оцінити ефективність алгоритмів. Система також дозволяє фіксувати результати у вигляді лог-файлів із часовими мітками та значеннями параметрів, що полегшує аналіз. Результати моделювання показали високу відповідність очікуваній поведінці системи регулятора, його здатність до стабілізації параметрів у разі перевантажень або збоїв, а також гнучкість у налаштуванні захисних алгоритмів. Розроблена методика дозволяє скоротити тривалість і вартість випробувань, мінімізувати ризики при тестуванні на ранніх етапах розробки, а також забезпечити необхідний рівень достовірності моделювання. Запропонований підхід може бути використаний на всіх етапах життєвого циклу розробки систем керування авіаційними двигунами – від проектування до сертифікаційних випробувань. Окрім того, розроблена утиліта може бути адаптована до інших типів двигунів, що свідчить про її універсальність та потенціал масштабування в галузі авіаційного двигунобудування.

Ключові слова: газотурбінний двигун; критичні режими; запуск і зупинка; електронний регулятор; система керування; захисти регулятора; моделювання; аварійні стани; діагностика несправностей.

Вступ

Газотурбінний двигун (ГТД) ТВ3-117 широко застосовується в авіації як основна силова установка гелікоптерів. Його робота у режимах запуску та зупинки супроводжується складними перехідними процесами, що потребують надійного функціонування систем керування та захисту. Підвищення температури, перевищення частоти обертання, або збої у сенсорних каналах – це типові критичні ситуації, які можуть виникати саме в ці моменти.

Для перевірки алгоритмів регулятора без залучення реального двигуна використовуються стенд-імітатори з вбудованими математичними моделями [1]. У цьому дослідженні така модель застосовується як основа для проведення випробувань. На її базі реалізовано набір перевірок, які охоплюють штатні й аварійні сценарії запуску та зупинки, а також

дозволяють фіксувати спрацювання захисних функцій. Керування процесом моделювання та формування впливів здійснюється з використанням програмної утиліти, яка забезпечує гнучке налаштування алгоритмів перевірки та контроль послідовності дій.

Постановка задачі дослідження

Метою дослідження є розробка імітаційних моделей та методів для аналізу критичних сценаріїв запуску та зупинки ГТД ТВ3-117, а також верифікація роботи його систем захисту. Завдання моделі – відтворювати роботу двигуна на всіх режимах «від запуску до зупинки» у реальному масштабі часу з урахуванням структури системи автоматичного регулювання і захисних алгоритмів, як зазначено у [2], це дозволяє поєднати моделювання з метрологічною перевіркою. Для реалізації цього підходу використовуються



Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International

стенд-імітатор двигуна, а також модель блок-схеми системи управління з відповідними алгоритмами.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Визначити перелік критичних ситуацій, характерних для режимів запуску та зупинки ГТД, які можуть призвести до аварій або порушення безпеки.
2. Побудувати математичну модель ГТД, здатну адекватно відтворювати динамічні процеси на зазначених режимах.
3. Розробити сценарії відмов, зокрема перевищення температури, обриви каналів датчиків, надмірне зростання частоти обертання.
4. Під'єднати реальний пристрій через апаратний стенд.
5. Виконати серію випробувань, симулюючи обрані критичні сценарії, та зафіксувати реакцію системи керування.
6. Проаналізувати ефективність алгоритмів захисту та визначити їхню стійкість до помилок і затримок у роботі.

Аналіз критичних сценаріїв

Критичні сценарії запуску та зупинки ГТД включають ситуації, коли двигун працює поблизу межових режимів та може виникнути небажана дестабілізація. Під час запуску й різкого нарощування обертів можливий виникнення явищ роторного бігу, перевантаження палива або невідповідності подачі палива, що може призвести до збою за командою регулятора. Під час зупинки, особливо при швидкому зменшенні подачі палива, робоча лінія компресора може підійти до зони стійкості, що загрожує «зривом компресора». Початок явища «зриву» характеризується великими відхиленнями тиску і масового витрати, іноді навіть зворотним потоком газу через компресор. Це може пошкодити елементи турбіни. Таким чином, основними критичними сценаріями є [3]:

1. Зрив або помпаж компресора: раптові пульсації тиску і обрив потоку, що виникають при переходах через невідповідні режими. При «надзвичайних зупинках» компресор часто опиняється біля межі стійкості, а сам перехід в стан зриву супроводжується «сильними коливаннями тиску та витрати, навіть зворотним потоком». Захист регулятора повинен передбачати активне відкриття байпасних клапанів або зниження швидкості на обмеженні, щоб уникнути цього.
2. Перевищення обертів: при швидкому нагнітанні подачі палива під час старту, при відмові клапанів зупинки, при різкому зменшенні навантаження або відмові регулятора можливе надмірне зростання

обертів турбокомпресора. В моделі спрацьовує захисний алгоритм: при перевищенні критичного значення обертів газогенератора регулятор обмежує подачу палива.

3. Падіння тяги чи загоряння: під час зниження палива можуть виникати акумульовані в колекторі газу або зміни температур, що сприяють загорянню чи іскренню. Регулятор захищає двигун від передчасного розгону.

4. Відмови датчиків/виконавчих механізмів: наприклад, одностороння відмова клапана регулювання палива може викликати відміну сигналу про тягу. Захист регулятора має реагувати на такі відмови через перехід на резервний канал чи відмовостійкі алгоритми.

5. Збої міжблочного зв'язку. Імітуються порушення каналів обміну між модулями регулятора, що дозволяє перевірити стійкість алгоритмів регулювання до втрат сигналів.

6. Перегрів або недостатній подавання палива. Стенд може моделювати ситуації, коли через зовнішні впливи змінюються параметри повітряної подачі або паливної системи, щоб переконатись у спрацьовуванні захистів.

7. Аварійне відключення/запуск. Перевіряється поведінка регулятора при різкому втручанні або при ініціації пуску двигуна. Сценарії мають охоплювати фактичні перехідні процеси запуску/зупинки.

8. Несправність пуску: відсутність запалювання або нестабільне зростання обертів після подачі палива.

9. Занадто повільний розгін: ситуація, коли двигун запалюється, але не досягає необхідних обертів, що може спричинити хибні пуски або зупинку двигуна.

10. Відмова одного двигуна: для двомоторних гелікоптерів відмова одного ГТД є критичним сценарієм. За проєктними алгоритмами, в цьому разі другий двигун автоматично переходить на надзвичайний режим (режим НР) для компенсації втраченої тяги.

Методи моделювання

У даній роботі математична модель газотурбінного двигуна ТВ3-117 використовується як складова частина стендово-імітаційного комплексу. Модель побудована на основі диференціальних рівнянь, що описують динаміку основних агрегатів двигуна: компресора, турбіни, камери згоряння, паливної системи та ротора. Вона забезпечує відтворення переходів між режимами роботи двигуна в реальному масштабі часу, включаючи типові параметри – тиск, температуру, частоту обертання, витрату палива тощо.

Модель реалізована як замкнута система з зовнішнім інтерфейсом керування та доступом до внутрішніх змінних[4]. Це дає змогу подавати на її входи сигнали з імітованого регулятора або утиліти перевірок, а на виходах отримувати реакцію моделі для подальшого аналізу. Безпосереднє втручання в математичну структуру моделі в межах даного дослідження не проводилося – основна увага зосереджена на формуванні входних впливів, умов перевірок, контрольних сценаріїв та аналізу реакції системи.

Для цього розроблено набір типових алгоритмів перевірки, які реалізуються в середовищі утиліти перевірок. Вони формують необхідну послідовність впливів на виконавчі органи моделі, імітують запуск або зупинку, створюють аварійні умови та фіксують реакцію захисних механізмів. Усі перевірки будуються за блочною логікою з використанням умовних переходів, затримок, арифметичних операцій та журналювання результатів. Такий підхід дозволяє протестувати поведінку системи керування в умовах, максимально наближених до реальних, не змінюючи внутрішню структуру математичної моделі двигуна, а керуючи її динамікою через зовнішні програмні впливи. Це забезпечує гнучкість і швидке налаштування нових сценаріїв, включно з перевітками захис-

тів, що особливо важливо під час випробувань регуляторів на ранніх етапах розробки. Головне вікно програми наведено на рис. 1.

Реалізація імітації запуску/зупинки

У якості інструменту для візуального налаштування логіки перевірок використано спеціалізоване програмне середовище – утиліта перевірок, що дозволяє конфігурувати окремі сценарії запуску, зупинки та тестування захистів у вигляді блок-схем [5]. Логіка формування впливів на модель реалізується з використанням функціональних вузлів: затримок, генераторів сигналів, логічних умов, арифметичних обчислень, а також модулів запису в СОМ-порт або файл. Такий підхід забезпечує гнучке керування послідовністю ввімкнення виконавчих елементів, перевірку статусів, а також взаємодію з регулятором у реальному часі.

У процесі моделювання всі сигнали системи фіксуються автоматично та формують протоколи перевірок. Це дозволяє отримати повну хронологію процесу запуску, активації захистів і зупинки, включно з часовими мітками, величинами керуючих параметрів та статусами. У разі виникнення логічної помилки або незавершеного сценарію (наприклад, відсутності завершального вузла), система виводить відповідне повідомлення, що значно спрощує налагодження.

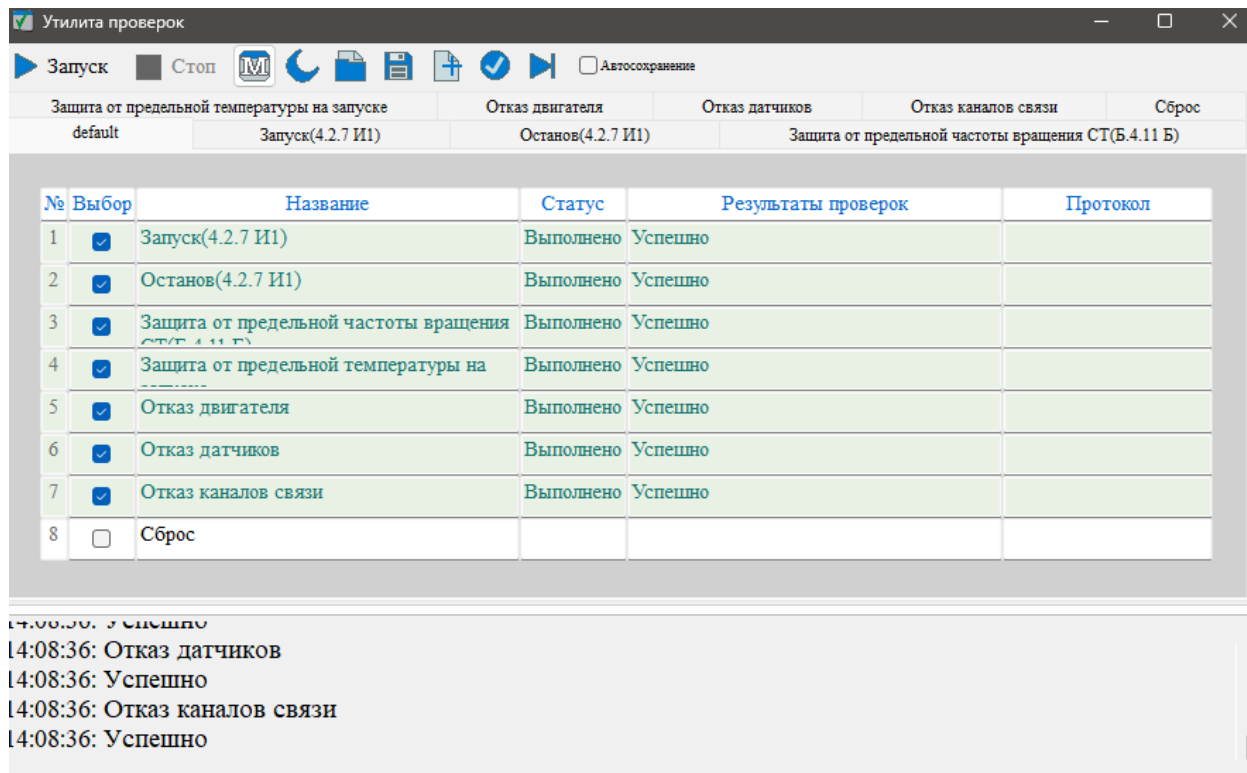


Рис. 1. Головна вкладка утиліти автоматизації перевірок

Таким чином, розроблена утиліта дозволяє не тільки моделювати режими роботи ГТД, але й автоматизувати випробування алгоритмів захисту регулятора.

Стенд-імітатор, з яким працює утиліта, містить вбудовані математичні моделі основних агрегатів двигуна: приводу стартера, паливного насоса-дозатора, редуктора, направляючих лопаток компресора, несучого гвинта та інших виконавчих механізмів. Взаємодія моделі з утилітою забезпечує повний замкнений цикл «регулятор-двигун» на етапі запуску та зупинки.

Основні імітаційні сценарії реалізуються наступним чином:

1. Запуск двигуна: емуляція пускової послідовності включає кілька етапів. Спочатку система проводить передпускові перевірки, потім активується пілотна пальник і розганяється ротор газогенератора до мінімальних обертів з допомогою стартера. Далі відбувається розпал основних пальників через подачу палива, після чого витрата палива нарощується за визначеним графіком, підтримуючи стійкість полум'я. У моделі це відображено як блок «пуск», що послідовно активується. Після розгону на відповідну швидкість контролер переходить до замкненого регулювання обертів газогенератора. Алгоритм перевірки в утиліті автоматизації наведено на Рис.2.

2. Зупинка двигуна: моделюється як плавне прекриття подачі палива за певною профільною функцією. При зупинці система також забезпечує необхідне охолодження двигуна і контролює послідовність відключення агрегатів. Модель фіксує моменти

спрацьовування клапанів відсічення палива і повернення системи в режим очікування.

Перевірка захистів регулятора

Стенд-імітатор використовується для тестування усіх захисних функцій електронного регулятора, що реалізовані в контролері ТВ3-117, зокрема:

1. Обмеження частоти обертання. при перевищенні допустимої швидкості газогенератора або вільної турбіни система регулювання спрацьовує як захисний контролер.

2. Температурні обмежувачі. при досягненні критичних температур захисники двигуна поступово знижують обертання вільної турбіни або примусово зменшують режим. У моделі це відображено сигналами, які активують відповідний алгоритм зменшення палива.

3. Відмова двигуна: сценарій раптової відмови одного ГТД імітується обнуленням його тяги. За моделлю, це призводить до автоматичного переходу другого двигуна у надважкий режим (ЧР). При цьому перевіряється, чи відбувається коректне перемикавання режимів і стабілізація решти системи.

4. Відмова датчиків. модель дозволяє задавати заниження чи завищення сигналів сенсорів для тестування логіки виявлення збоїв. Система має визначити невідповідність сигналу очікуваним та відреагувати – наприклад, перейти в режим діагностики або звукового сигналу. У дослідженні також впроваджено імітаційну модель відмови з ймовірнісним розподілом параметрів, що дає змогу прогнозувати відмови і мінімізувати їхній вплив.

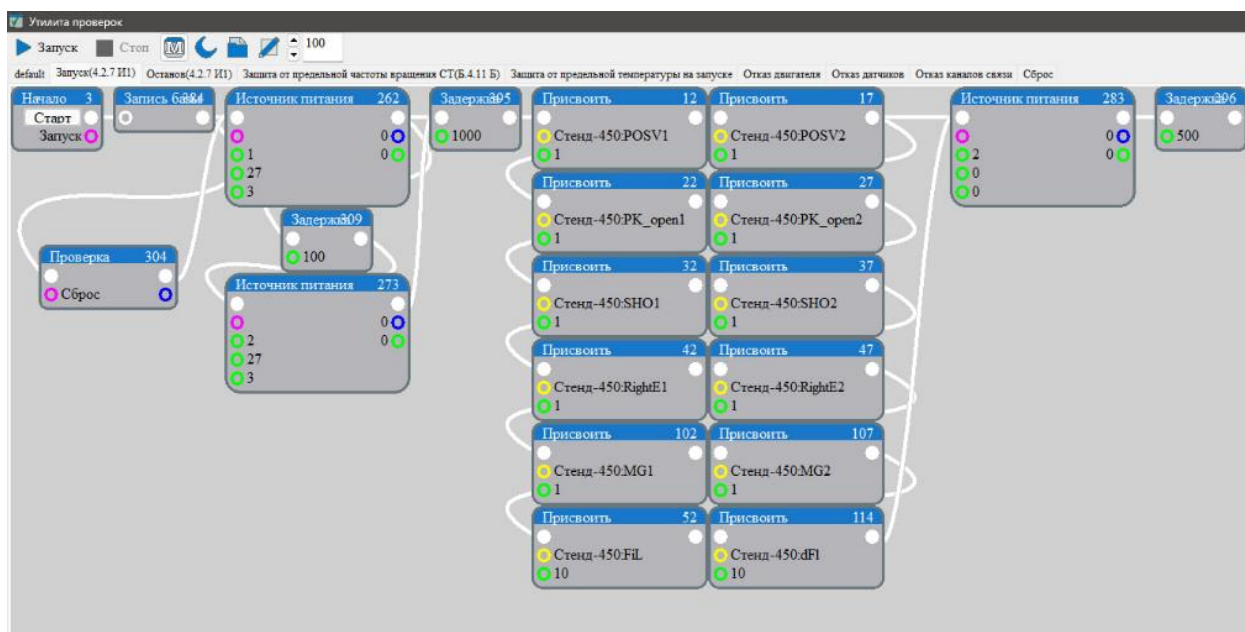


Рис. 2. Алгоритм перевірки запуску

5. Відмова каналів зв'язку. Реалізується на рівні протоколів обміну: модуль стенду допускає впровадження шуму, затримок або втрат пакетів між модулями САУ і зовнішніми пристроями. Це дозволяє оцінити реакцію регулятора на збої в CAN/ARINC-429 каналах, що імітують відмову КІП або інших систем.

6. Екстрене зупинення двигуна. Імітується наприклад заглушення мотора у небезпечних режимах (датчики показують раптову критичну величину), щоб перевірити алгоритм аварійного зупину.

Таким чином, весь набір захисних алгоритмів регулятора перевіряється в автоматизованому режимі на стенді-імітаторі [6]. Для кожного режиму фіксуються вихідні параметри моделі і сигнали відмов, що надходять до пульта моніторингу, забезпечуючи повноцінний аналіз спрацювань захисту.

Результати аналізу

Імітаційні дослідження критичних сценаріїв показали, що запропоновані моделі адекватно відтворюють очікувану поведінку системи управління та захистів. Зокрема, у моделі при перевищенні максимально допустимої частоти обертів турбокомпресора спрацює захисна логіка регулятора: подача палива автоматично обмежується, що стабілізує обороти. При симуляції відмови одного двигуна модель переводить другий двигун у надзвичайний режим, як і передбачено конструкцією. Випробування нечіткої адаптивної системи керування показали високу стійкість до відмов. Так, при імітації випадкових збурень параметрів двигуна вартість функції якості залишалась набагато нижчою за граничне значення. Це свідчить про те, що розроблена система забезпечує збереження керованості та мінімізує відхилення від заданих параметрів навіть за наявності несправностей. Загалом, моделювання аварійних і штатних режимів дає змогу переконатися в коректній роботі алгоритмів захисту. Виконані симуляції відповідають очікуваному результату: система управління ефективно реагує на перевантаження та несправності, забезпечуючи захист двигуна і плавний перехід в безпечні режими роботи.

Застосування імітаційної моделі двигуна та утиліти перевірок дозволяє забезпечити комплексні випробування регулятора ТВ3-117 на різних етапах розробки та виробництва, оскільки дозволяють відтворити більшість режимів без участі реального двигуна. Практичні проекти показали, що впроваджені апаратно-програмні комплекси для стендів імітатора успішно зарекомендували себе при розробці систем автоматичного керування іншими авіаційними двигунами [7].

Висновки

У статті розглянуто підхід до розробки алгоритмів захисту регулятора газотурбінного двигуна ТВ3-117 шляхом імітації критичних сценаріїв запуску та зупинки на базі стенду-імітатора з використанням готової математичної моделі. Реалізація алгоритмів перевірок у візуальному середовищі забезпечує зручне керування логікою випробувань та дозволяє точно відтворити аварійні ситуації без залучення реального двигуна.

Результати досліджень підтверджують здатність системи захисту регулятора своєчасно реагувати на перевищення допустимих параметрів, відмови датчиків, порушення логіки запуску або зупинки, а також на втрати зв'язку між модулями. Утиліта перевірок довела ефективність у побудові контрольованих сценаріїв, що підходять як для попередньої розробки, так і для серійних випробувань.

Застосування такого підходу дозволяє істотно підвищити рівень автоматизації тестування, зменшити ризики при відлагодженні, а також скоротити витрати на проведення експериментів. Перспективним напрямом подальших робіт є розширення бібліотеки перевірок, інтеграція цифрових двійників та реалізація моделей адаптивного самоналаштування алгоритмів захисту залежно від технічного стану двигуна.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис не має супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Стенд-имитатор авиадвигателя как универсальное средство обеспечения разработки и испытаний регуляторов [Текст] / А. Г. Буряченко, Д. С. Бурунов, В. М. Грудинкин, & А. О. Таранішин // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – № 7 (167). – С. 83-88. doi: 10.32620/aktt.2020.7.12.
2. Буряченко, А. Г. Метрологическое обеспечение испытаний электронных регуляторов ГТД–стенд-имитатор двигательных датчиков [Текст] / А. Г. Буряченко, & И. К. Лопашенко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2018. – №7(151). – С. 101-106. doi: 10.32620/aktt.2018.7.15.
3. Буряченко, А. Г. Стенд-имитатор турбовального двигателя АИ-450М для испытаний регулятора двигателя. Метрологическое обеспечение и аттестация стенда [Текст] / А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин, & Д. С. Бурунов // *Вестник двигателестроения*. – 2015. – №2. – С. 95-101.
4. Лопунова, Н. Н. Модернизация программно-технического комплекса ПТК-МСБ-2 для автоматизации ресурсных испытаний вертолётов [Текст] / Н. Н. Лопунова, & В. В. Нерубасский // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2018. – № 8 (152). – С. 128-132. doi: 10.32620/aktt.2018.8.20.
5. Буряченко, А. Г. Компактный аппаратно-программный комплекс для диагностики электронных регуляторов САУ ГТД в эксплуатации [Текст] / А. Г. Буряченко, Д. С. Бурунов, & О. В. Немченко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 4. – С. 73-78. doi: 10.32620/aktt.2021.4.10.
6. Стенды-имитаторы и их применение на различных стадиях жизненного цикла систем управления газотурбинных двигателей [Текст] / Д. И. Волков, В. М. Грудинкин, В. А. Качура, & А. А. Разладский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 9 (56) – С. 133-137.
7. Математичне моделювання робочих процесів авіаційного газотурбінного двигуна ТВ3-117 для контролю і діагностики його технічного стану [Текст] / С. І. Владов, Ю. М. Шмельов, Л. М. Пилипенко [та ін.] // *Вестник Херсонского национального технического университета*. – 2020. – №1(72), Ч. 1. – С. 18-34.

References

1. Buryachenko, A. H., Burunov, D. S., Hrudynkyn, V. M., & Taranishyn A. O. Stend-imitator aviadvigatelja kak universal'noe sredstvo obespechenija razrabotki i ispytaniy reguljatorov [Engine Simulator as a Universal Tool for the Development and Testing of Engine Control Units]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 7

(167), pp. 83-88. doi: 10.32620/aktt.2020.7.12. (In Russian).

2. Buryachenko, A. H., Lopashchenko, I. K. Metrologicheskoe obespechenie ispytaniy jelektronnyh reguljatorov GTD–stend-imitator dvigatel'nyh datchikov [Metrological support for testing electronic gas turbine engine regulators – engine sensor simulator stand]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2018, no. 7(151), pp. 101-106. doi: 10.32620/aktt.2018.7.15. (In Russian).

3. Buryachenko, A. H., Hrudinkin, V. M., Burunov, D. S. Stend-imitator turboval'nogo dvigatelja AI-450M dlja ispytaniy reguljatora dvigatelja. Metrologicheskoe obespechenie i attestacija stenda [Turboshaft Engine AI-450M Simulator for Engine Controller Testing: Metrological Support and Stand Certification]. *Vestnyk dvyhatelestroenyya - Herald of aeroenginebuilding*, 2015, no. 2, pp. 95-101. (In Russian).

4. Lopunova, N. N., Nerubasskyy, V. V. Modernizacija programmno-tehnicheskogo kompleksa PTK-MSB-2 dlja avtomatizacii resursnyh ispytaniy vertoljotov [Modernization of the software and hardware complex PTK-MSB-2 for automation of resource tests of helicopters]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2018, no. 8(152), pp. 128-132. doi: 10.32620/aktt.2018.8.20. (In Russian).

5. Buryachenko, A. H., Burunov, D. S., & Nemchenko, O. V. Kompaktnyy apparatno-programmnyy kompleks dlya diagnostiki elektronnykh reguljatorov SAU GTD v ekspluatatsii [Compact hardware and software complex for diagnostics of electronic regulators of GTE ACS in operation]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 4, pp. 73-78. doi: 10.32620/aktt.2021.4.10. (In Russian).

6. Volkov, D. Y., Hrudynkyn, V. M., Kachura, V. A., & Razladskey, A. A. Stendy-imitatory i ih primenenie na razlichnyh stadijah zhiznennogo cikla sistem upravleniya gazoturbinnnyh dvigatelej [Engine Simulators and Their Application at Different Stages of the Life Cycle of Gas Turbine Engine Control Systems]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology* 2008, no. 9 (56), pp. 133-137. (In Russian).

7. Vladov, S. I., Shmel'ov, Yu. M., Pylipenko, L. M., Podhornykh, N. V., Nazarenko, N. P., Tutova, N. V. & Dyeryabina, I. O. Matematychnye modelyuvannya robochykh pro-tsesiv aviatsiynoho hazoturbinnoho dvyhuna TV3-117 dlya kontrolyu i diahnostyky yoho tekhnichnogo stanu [Mathematical Modeling of Operating Processes in the TV3-117 Aviation Gas Turbine Engine for Technical Condition Monitoring and Diagnostics]. *Visnyk KHNTU – Visnyk of Kherson national technical university*, 2020, no. 1 (72), Ch. 1, pp. 18-34. (In Russian).

**MODELING OF CRITICAL START-UP AND SHUTDOWN SCENARIOS
OF A GAS TURBINE ENGINE FOR TESTING REGULATOR PROTECTIONS****Serhii Vialov**

This study presents a methodology for simulation-based modeling of critical start-up and shutdown scenarios of the TV3-117 gas turbine engine to test the electronic controller's protection algorithms. The proposed approach uses a hardware-in-the-loop simulation test bench with an integrated mathematical engine model, enabling real-time emulation of engine dynamics without the need for actual equipment. Based on this model, an automated test utility was developed, allowing the construction of start-up, shutdown, and emergency impact scenarios using logical block diagrams. The utility's algorithms offer flexible configuration of action sequences, parameter values, fault injection, and control system response evaluation under various conditions. Simulations were conducted for both nominal and critical modes, including temperature and overspeed limit violations, delayed ignition, sensor channel faults, communication failures, and emergency engine shutdowns. The protection logic of the controller was tested for various scenarios, such as overspeed protection, temperature limiting, emergency power mode switching in case of engine failure, power loss, and inter-module communication disruptions. System responses were recorded for each case, enabling the assessment of algorithm effectiveness. The utility also supports real-time signal and parameter logging with time stamps to facilitate detailed analysis. The modeling results demonstrated a high level of correspondence with expected controller behavior, including the system's ability to stabilize parameters under fault conditions and overloads, as well as flexible adaptation of protection logic. The developed methodology reduces testing time and cost, minimizes risks at early development stages, and ensures high simulation credibility. The proposed solution is applicable throughout the entire life cycle of engine control system development – from design to certification testing. Moreover, the test utility can be adapted to other engine types, highlighting its universality and scalability in the field of aerospace propulsion system development.

Keywords: gas turbine engine; critical modes; start-up and shutdown; electronic controller; control system; controller protections; modeling; fault conditions; fault diagnostics.

Вялов Сергій Русланович – асп., НУ «Одеська політехніка»; інженер-електронік, АТ «Елемент», Одеса, Україна.

Serhii Vialov – PhD Student, Odesa Polytechnic National University; Electronic Engineer, JSC "Element", Odesa, Ukraine,
e-mail: vialov0608@gmail.com, ORCID: 0009-0006-7784-889.