УДК 621.45-57:681.51

Д. О. Кульбіцький, В. А. Хлоп'ячий

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ АВТОМАТИЧНОГО НАЗЕМНОГО ЗАПУСКУ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГУНА РД-33

Анотація. *Проведено аналіз принципів функціонування системи автоматичного наземного запуску турбореактивного двигуна РД-33. Розглянуто особливості параметрично-часового керування процесом запуску. Обґрунтовано перспективність удосконалення алгоритмів керування шляхом комплексного використання інформації від штатних датчиків та оцінювання динамічних характеристик перехідного процесу. Визначено напрями подальших досліджень щодо функціональної модернізації автомата запуску АПД-88 без конструктивних змін двигуна.*

Ключові слова: *турбореактивний двигун РД-33, система автоматичного запуску, АПД-88, алгоритм керування, наземний запуск, параметрично-часове керування, цифрове оброблення сигналів.*

Abstract. *The operating principles of the automatic ground-start system of the RD-33 turbofan engine are analyzed. The features of parameter- and time-based control during engine start-up are considered. The potential for improving control algorithms through integrated processing of signals from existing sensors and evaluation of the transient process dynamics is substantiated. Directions for further research on the functional modernization of the APD-88 automatic start controller without structural modifications to the engine are identified.*

Keywords: *RD-33 turbofan engine, automatic start system, APD-88, control algorithm, ground start, parameter- and time-based control, digital signal processing.*

Запуск авіаційного газотурбінного двигуна є складним перехідним процесом, під час якого має забезпечуватись узгоджена робота пускового пристрою, систем паливоподачі, запалювання та автоматичного керування. Ефективність функціонування системи запуску визначається забезпеченням виходу двигуна на режим малого газу з дотриманням встановлених обмежень за температурою газів, частотою обертання ротора та тривалістю окремих етапів.

У системах запуску авіаційних двигунів поширені алгоритми, побудовані на поєднанні програмно-часового керування із контролем окремих параметрів двигуна. Такий принцип реалізовано, зокрема, у системі запуску турбореактивного двоконтурного двигуна РД-33 літака МиГ-29 [1, 2].

Розвиток електронних засобів автоматичного керування та методів цифрового оброблення сигналів створює передумови для удосконалення алгоритмів запуску авіаційних двигунів [3], зокрема шляхом розширення можливостей використання інформації від штатних датчиків без внесення конструктивних змін до двигуна.

Метою дослідження є аналіз принципів функціонування системи автоматичного наземного запуску двигуна РД-33 та обґрунтування перспективних напрямів удосконалення алгоритмів керування з максимальним використанням штатних вимірювальних і виконавчих пристроїв.

Наземний запуск двигунів РД-33 літака МиГ-29 здійснюється із застосуванням спільного турбокомпресорного стартера-енерговузла ГТДЕ-117, який забезпечує розкрутку роторів двигунів через систему механічних передач. Керування послідовністю роботи агрегатів системи запуску здійснюється автоматом АПД-88 у взаємодії з іншими електронними блоками системи керування двигуном [1, 2].

АПД-88 формує електричні команди на ввімкнення та вимкнення агрегатів запуску відповідно до заданої програми. Перехід між окремими етапами здійснюється за встановленими часовими інтервалами або за сигналами досягнення визначених параметрів двигуна та стартера.

Отже, штатна система реалізує комбінований параметрично-часовий алгоритм керування. Такий підхід забезпечує автоматизацію процесу запуску, проте можливості

використання додаткової інформації про динаміку зміни параметрів двигуна потребують окремого дослідження.

Зокрема, поточне значення частоти обертання ротора характеризує його стан у визначений момент часу, тоді як темп її зміни містить додаткову інформацію про характер розгону. Спільний аналіз цих параметрів потенційно дозволяє точніше оцінювати перебіг перехідного процесу та виявляти відхилення від очікуваних характеристик запуску.

Розвиток систем автоматичного керування авіаційними газотурбінними двигунами підтверджує доцільність розширення функціональних можливостей електронної автоматики. Зокрема, у системі керування двигуном АЛ-31ФП застосовується електронно-гідромеханічний регулятор КРД-99Б, який забезпечує регулювання параметрів двигуна та взаємодію з іншими пристроями керування й засобами реєстрації інформації [4]. Такий підхід свідчить про можливість комплексного використання вимірювальних сигналів у системах автоматичного керування авіаційними двигунами.

У наукових дослідженнях систем керування газотурбінними двигунами також розглядаються можливості використання темпу зміни частоти обертання ротора, комбінованих законів керування та аналізу перехідних характеристик для підвищення інформативності автоматичного контролю [5–7].

З урахуванням зазначеного перспективним напрямом удосконалення системи наземного запуску РД-33 може бути функціональна модернізація автомата АПД-88 шляхом застосування електронного блока з розширеними можливостями оброблення вимірювальної інформації та реалізації алгоритмів керування.

Принциповою особливістю такого підходу є орієнтація на максимальне використання наявних датчиків, електричних сигналів і виконавчих пристроїв. Додаткові інформаційні ознаки можуть формуватися шляхом цифрової фільтрації, диференціювання, інтегрування та спільного аналізу контрольованих параметрів.

До перспективних функцій модернізованого автомата доцільно віднести оцінювання динаміки розгону ротора, контроль узгодженості параметричних і часових умов переходу між етапами запуску та виявлення відхилень у роботі системи на основі комплексного аналізу доступних сигналів.

Реалізація зазначених функцій потребує дослідження характеристик сигналів штатних датчиків, встановлення можливостей їх використання та визначення допустимого впливу додаткових алгоритмів на функціонування системи запуску.

Подальше дослідження доцільно спрямувати на визначення інформаційних можливостей штатної системи запуску РД-33, обґрунтування структури модернізованого електронного автомата та розроблення алгоритмів керування з урахуванням динамічних характеристик перехідного процесу.

Для оцінювання ефективності запропонованих рішень передбачається застосувати імітаційне моделювання з порівнянням функціонування штатного та удосконаленого алгоритмів за нормального запуску й за наявності характерних відхилень контрольованих параметрів. Обов'язковою умовою є збереження встановлених обмежень і захисних функцій системи запуску.

Висновки.

Аналіз системи автоматичного наземного запуску двигуна РД-33 показав, що її функціонування ґрунтується на комбінованому параметрично-часовому алгоритмі керування.

Визначено перспективний напрям удосконалення, який полягає в розширенні алгоритмічних можливостей автомата запуску завдяки комплексному використанню штатних вимірювальних сигналів та оцінюванню динамічних характеристик процесу запуску.

Запропонований підхід передбачає можливість функціональної модернізації електронної автоматики без конструктивних змін двигуна й основних виконавчих пристроїв. Подальші дослідження мають бути спрямовані на обґрунтування алгоритмів керування та оцінювання їх ефективності методами імітаційного моделювання.

Список використаних джерел

1. Турбореактивний двоконтурний двигун з форсажною камерою згорання РД33-2С: навчальний посібник / ред. В. В. Кулешова. 1986.
2. Літак 9-12 (9-13). Керівництво по технічній експлуатації. Книга 4. Авіаційне обладнання. Розділ 1. Електрообладнання. Розділ 080.00.00.
3. Швець П. М., Хлоп'ячий В. А. Шляхи удосконалення системи запуску авіаційного двигуна. *Актуальні проблеми бойового застосування, експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки*: матеріали V Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції, 11–12 листопада 2025 р. Вінниця: ВНТУ, 2025. С. 279–280.
4. Government of India. Department of Public Enterprises. Public Enterprises Survey 2017–18. Volume I. New Delhi, 2019. P. 110. URL: https://www.dpe.gov.in/static/uploads/2025/08/879cfa2ab16efbf7be2f1b51e7ba7bd5.pdf
5. Tovkach S. Control Programs of the Aviation Gas Turbine Engine in the Modes of Acceleration, Gas Reset, Start-up. Optimization and Estimation of the Quality of Control Programs. *Electronics and Control Systems*. 2022. Vol. 4(74). P. 27–38. DOI: 10.18372/1990-5548.74.17293.
6. Ping K., Dai Y., Zhao H., Song Z. Integrated penalty control: A highly robust start-up control schedule design method for gas turbine engines. *Aerospace Science and Technology*. 2025. Vol. 158. Article 109903. DOI: 10.1016/j.ast.2024.109903.
7. Kim K., Uluyol O., Parthasarathy G., Mylaraswamy D. Fault Diagnosis of Gas Turbine Engine LRUs Using the Startup Characteristics. *Annual Conference of the PHM Society*. 2012. Vol. 4, No. 1. DOI: 10.36001/phmconf.2012.v4i1.2129.

Кульбіцький Денис Олегович *– Харківський національний університет Повітряних Сил імені. Івана Кожедуба, слухач 242 навчальної групи, Харків, Україна; email: denis.kulbitskiy2006@gmail.com* ;

Хлоп'ячий Вячеслав Анатолійович *– Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, професор кафедри авіаційного обладнання літаків і вертольотів, Харків, Україна; email: 0674648530@ukr.net; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4038-9551*

Kulbitskiy Denis Olegovich *– Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, student of 242 training group, Kharkiv, Ukraine; email: denis.kulbitskiy2006@gmail.com ;*

Khlopyachyi Vyacheslav Anatoliyovych *– Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Professor, Department of Aviation Equipment of Airplanes and Helicopters, Kharkiv, Ukraine; email: 0674648530@ukr.net; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4038-9551*