

Красноручський А. О., Іващенко А. Є., Петренко А. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЖЕРЕЛ ЗМІННОГО СТРУМУ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ЗАВДЯКИ ЗАСТОСУВАННЮ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

Анотація. На підставі систематичного аналізу сучасних підходів до технічного обслуговування літальних апаратів у нештатних точках дислокації в умовах бойових дій оцінюється можливість розроблення інструментів і засобів, що підвищують ефективність їх підготовки до застосування в бойових умовах.

Ключові слова: генератор, спектральний аналіз, еталон, надійність, спектр.

Abstract. Based on a systematic analysis of contemporary approaches to the technical maintenance of aircraft at austere deployment locations during combat operations, the feasibility of developing tools and equipment to enhance the effectiveness of their preparation for combat employment is evaluated.

Key words: generator, spectral analysis, reference, reliability, spectrum.

Повномасштабне військове вторгнення росії зробило питання надійності авіаційних систем критичним. Насамперед це стосується систем електроживлення літаків, адже безперебійне постачання напруги є основою безпечної експлуатації авіатехніки. Напружені умови бойових дій (висока напруженість використання техніки, ракетні та радіоелектронні удари по аеродромах і логістиці) суттєво ускладнюють проведення планового технічного обслуговування. Надійність системи електроживлення є критично важливою для безпеки польотів та стабільної роботи літака. Будь-який збій у роботі генераторів або перетворювачів може призвести до відмови систем керування та навігації, що безпосередньо загрожує безпеці екіпажу. У сучасних умовах повномасштабної війни ефективне обслуговування військових літаків набуває особливої ваги, адже надійність їх електросистем безпосередньо впливає на боєздатність авіації та оперативність виконання завдань.

В умовах сучасного застосування авіаційної техніки особливої уваги потребує надійність систем електроживлення повітряних суден. На більшості сучасних літаків та вертольотів первинними джерелами живлення є синхронні генератори та перетворювачі змінного струму (частіше трифазні, 400 Гц). Складна конструкція таких генераторів (збудник із обертовим випрямлячем, регулятор напруги, захист тощо) вимагає постійного контролю технічного стану. З огляду на інтенсифікацію польотної експлуатації та особливості ведення бойових дій зростають вимоги до безвідмовності систем електропостачання. Ненадійність електроживлення може спричинити відмову критичних бортових систем (зв'язку, навігації, керування), що неприпустимо під час польоту. Система електроживлення забезпечує літак необхідною потужністю при мінімальних габаритах і вазі, проте кожен її елемент може бути джерелом несправності. Забезпечення безвідмовної роботи в цих умовах вимагає впровадження нових підходів до моніторингу технічного стану джерел живлення повітряного судна. Сучасні методи діагностики авіаційних генераторів змінного струму зазвичай зосереджені на контролі рівня вихідної напруги та основних параметрів (струму, частоти, характеристик регулятора). Наявні системи самоконтролю переважно перевіряють напругу, струм і температуру обмоток, що не дозволяє виявити приховані дефекти на ранніх стадіях. Наприклад, типовими прихованими дефектами є:

1. Знос або пошкодження підшипників генератора.
2. Часткові короткі замикання витків обмотки статора чи ротора.
3. Вихід з ладу одного або кількох діодів обертового випрямляча збудника.

Такі відмови практично не змінюють середню величину вихідної напруги, але спричиняють характерні гармонічні спотворення сигналу. Відсутність детального аналізу спектра напруги обмежує здатність виявляти ці приховані відхилення та знижує ефективність превентивного обслуговування. Відтак виникає потреба розробки нового методу контролю, що

доповнював би наявні засоби діагностики шляхом аналізу спектрального складу вихідної напруги.

Спектральний аналіз доповнює традиційні методи діагностики, дозволяючи враховувати не лише амплітудні параметри (рівень напруги, струму), але й форму сигналу. Запропоновано вдосконалити методи діагностики через комплексний аналіз спектрального складу вихідної напруги генератора змінного струму. Вимірюється синусоїдальний сигнал напруги на виході джерела та обчислюється його спектр (наприклад, методом швидкого перетворення Фур'є). Практика показує, що дефекти в механічній або електричній частинах генератора призводять до появи нових або зміни амплітуд характерних гармонік у цьому спектрі. Перевагою цього методу є відсутність необхідності модифікувати сам генератор: вимірювання вихідної напруги здійснюється наявними бортовими датчиками. Наприклад, при обриві однієї з фаз обмотки збудження у спектрі з'являються додаткові гармонічні компоненти, а при короткому замиканні діода обертового випрямляча змінюються амплітуди окремих гармонік. За реалізацією слідує порогова оцінка: якщо рівень певної характерної гармоніки перевищує встановлений поріг, система видає сигнал тривоги про можливу відмову.

Для ілюстрації було створено віртуальну модель трифазного синхронного генератора, на якій отримано спектри напруги для нормального режиму роботи, а також для типових дефектів (наприклад, обрив фази збудження або коротке замикання діода випрямляча). Такі результати дозволяють сформувати базу еталонних спектрів, що слугує для порівняння з реальним спектром генератора і полегшує ідентифікацію характерних ознак кожного виду несправності. У реальному часі можна встановити порогові значення для амплітуд гармонік: якщо рівень певної частоти перевищує поріг, система сигналізує про необхідність перевірки. Метод може застосовуватися як у режимі періодичних перевірок перед польотом, так і для безперервного моніторингу під час польоту.

Застосування спектрального аналізу для діагностики джерел змінного струму забезпечує кілька важливих переваг порівняно з традиційними методами:

1. Безперервний моніторинг технічного стану генератора без необхідності відключення живлення або зупинки двигуна.
2. Раннє виявлення дефектів ще до того, як вони спричинять падіння середньої напруги.
3. Ідентифікація характерних несправностей (зношення підшипників, обриви обмоток, поломки діодів тощо) за формою спектра вихідної напруги.
4. Метод підходить для різних типів генераторів і режимів роботи завдяки наявності бази еталонних спектрів для різних умов.
5. Уніфікація процесу діагностики завдяки аналізу єдиного сигнального каналу (вихідної напруги) для виявлення різних типів дефектів.
6. Економічність реалізації – не потребує додаткового обладнання, використовуючи наявні датчики та ресурси бортових систем.
7. Для впровадження спектрального методу діагностики, слід передбачити швидко й точно вимірювання вихідної напруги за допомогою датчиків і аналого-цифрових перетворювачів із достатньою смуговою пропускну здатністю.
8. Базу еталонних спектрів (для нормальних режимів і типових дефектів), отриманих експериментально або за допомогою моделювання, з урахуванням різних режимів навантаження.
9. Інтеграцію з наявними бортовими системами моніторингу та управління електроживленням літака.

Таким чином, запропонований підхід сприяє підвищенню надійності діагностики електричних систем повітряного судна. Використання спектрального аналізу доповнює традиційні методи контролю, робить систему діагностики більш вдалою у визначенні початкових стадій розвитку дефектів. Підсумовуючи, це знижує ризик неочікуваних відмов генераторів у польоті, та підвищує ефективність технічного обслуговування авіаційних систем. Це відповідає сучасним вимогам безпеки і може знизити витрати на обслуговування, оскільки дефекти виявлятимуться на ранній стадії і планово усуватимуться. Загалом, система діагностики генераторів стає комплексною до визначення незначних відхилень, що сприяє підвищенню загальної надійності авіаційних систем.

Список використаних джерел

1. Системи електропостачання повітряних суден : навч. посіб. / О. Є. Зенович, В. А. Хлоп'ячий, В. М. Кривонос та ін. – Х. : ХНУПС, 2021. – 216 с.
2. Mohsen Mostafaei, Jawad Faiz. An overview of various fault detection methods in synchronous generators. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/elp2.12031>
3. DC / AC Converter Electrical Test Equipment. <https://www.highvoltage-tester.com/sale-10880316-dc-ac-converter-electrical-test-equipment-earth-resistance-testing-equipment.html>
4. <https://interferencetechnology.com/review-of-mil-std-704-requirements/>
5. <https://rfimmunity.com/wp-content/uploads/2017/04/MIL-STD-1275D.pdf>
6. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/f500bffb-45eb-422f-abb5-3e2e868a7b3b/en-2282-1992>

Красноруцький Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри авіаційного обладнання літаків і вертольотів інженерно-авіаційного факультету, e-mail: krasnorycki@ukr.net, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4318-2217>, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, вулиця Динамівська 3а, м. Харків, 61023.

Іващенко Артем Євгенійович – слухач 6 курсу інженерно-авіаційного факультету, e-mail: 59871515gm@gmail.com, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7303-2622>, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, вулиця Динамівська 3а, м. Харків, 61023.

Петренко Антон Вадимович – слухач 6 курсу інженерно-авіаційного факультету, e-mail: antonpetrenko10@gmail.com, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, м. Харків, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, вулиця Динамівська 3а, м. Харків, 61023.

Krasnorutsky Andriy Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Aviation Equipment of Airplanes and Helicopters, Faculty of Aviation Engineering, e-mail: krasnorycki@ukr.net, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4318-2217>, Kharkiv National Air Force University named after I. Kozhedub, 3a Dynamivska Street, Kharkiv, 61023.

Ivashchenko Artem Yevheniyovych – 6th year student of the Faculty of Aviation Engineering, e-mail: 59871515gm@gmail.com, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, Kharkiv, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7303-2622>, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, 3a Dynamivska Street, Kharkiv, 61023.

Petrenko Anton Vadymovych – 6th year student of the Faculty of Aviation Engineering, e-mail: antonpetrenko10@gmail.com, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, Kharkiv, Kharkiv National University of the Air Force named after I. Kozhedub, Dynamivska Street 3a, Kharkiv, 61023.

