ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ВИБРОМЕТРОВ ДЛЯ СЕРТИФИКАЦИИ БПЛА

А.Е. Байков[1], А.А. Бакастов[2]

[1] ООО АСМ тесты и измерения, г.Москва
[2] ООО Тест Партнер, г. Екатеринбург

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, сертификация, лазерная виброметрия, вибродиагностика, неразрушающий контроль

Сертификация отечественных беспилотных авиационных систем (БПЛА) сталкивается с рядом проблем, включая высокие затраты, длительные сроки процедур, отсутствие адаптированных норм и административные барьеры. Эти факторы замедляют развитие отрасли и ограничивают массовое внедрение БПЛА в различных применениях.

Лазерные доплеровские виброметры (ЛДВ) имеют высокий потенциал использования в области сертификации БПЛА ввиду бесконтактного способа измерения вибрации. ЛДВ позволяет исследовать вибрации компонентов, оценивать их динамическое состояние, а также проводить неразрушающий контроль конструкции в сборе. Это особенно актуально для контроля качества сборки БПЛА, диагностики двигателей, анализа устойчивости конструкций и соответствия устройства требованиям безопасности.

В настоящее время существует ряд моделей сканирующих и точечных лазерных виброметров, предназначенных для работы как в условиях производства, так и предназначенных для проведения выездных работ. Например, определения вибрационных характеристик двигателей БПЛА в условиях наземного запуска. Полученные результаты могут быть сопоставлены с данными, регистрируемыми бортовыми средствами контроля вибрации. Это позволит своевременно обнаружить дефекты двигателя и элементов БПЛА при их наличии.

Исследование вибрации корпуса БПЛА с использованием лазерной доплеровской виброметрии

Недавние достижения в области лазерной виброметрии показали возможность бесконтактного измерения вибрации вращающихся механизмов в процессе их функционирования. Полученные данные позволяют судить об особенностях работы двигателей и эффективности передачи вибрации от винтомоторной группы на различные элементы конструкции БПЛА.

Механизм синхронизации сканирующих лазерных виброметров от вращающихся машин описан ранее в работах других исследователей [1, 2]. На практике зачастую встречается неидеальная юстировка вращающихся валов, в связи с чем расстояние между лазерным интерферометром и измерительной точкой на поверхности вала изменяется по синусоидальному закону с частотой, соответствующей скорости вращения ротора. Пятно лазерного луча в данном случае описывает окружность на поверхности вращающегося вала и не остается

устойчивым в заданной системе координат, так как колебания вала происходят по эллипсу. Этот эффект незначителен, однако имеет существенный вклад в процедуру регистрации колебаний объекта: фактически, если измерение возможно при незначительном изменении расстояния, этот эффект имеет практическую пользу для выбора разрешения виброметра и коэффициента усиления сбора данных. Другими словами, эффект смещения лазерного пучка несет информацию о сигнале вибрации вращающегося механизма. В данном случае важное практическое значение имеет настройка лазерного луча на центральную ось вала с целью его отражения без углового смещения от полированной поверхности вала. Несмотря на то, что угловое смещение луча неизбежно, данный эффект можно минимизировать и исключить спекл-шумы.

Описанная процедура измерения вибрации на вращающихся валах может быть реализована на практике с использованием лазерных доплеровский виброметров одноточечного и сканирующего типов. Компания VLESS (KHP) является одним из ведущих мировых производителей лазерных доплеровский виброметров и предлагает готовые технические решения в области бесконтактной вибродиагностики.

В таблице 1 приведены технические характеристики некоторых моделей лазерных виброметров фирмы VLESS, которые могут быть использованы для решения задач сертификации БПЛА. В таблице приводятся следующие условные обозначения: Δf – диапазон рабочих частот, Δv – максимальный диапазон измерения скорости, Δx – максимальный диапазон измерения перемещения, Δl – рабочее расстояние.

Таблица 1. Технические характеристики некоторых моделей лазерных доплеровский виброметров компании VLESS (KHP)

Модель	Внешний вид устройства	Тип	Краткая информация
TP-LSV-500-3D		Трёхкомпонентный сканирующий (инфракрасный)	Δf: 0-3 МГц; Δv: ±30 м/с; Δx: ±4,9 м; Δl: 0,35-10 м.
TP-LSV-500		Однокомпонентный сканирующий (инфракрасный)	Δf: 0-3 МГц; Δv: ±30 м/с; Δx: ±4,9 м; Δl: 0,35-10 м.

TP-FLV-01		Инфракрасный оптоволоконный точечный	Δf: 0-3 МГц; Δv: ±30 м/с; Δx: ±4,9 м; Δl: 0,35-20 м.
LV-AFS01		Инфракрасный точечный (с автофокусировкой)	Δf: 0-3 МГц; Δv: ±30 м/с; Δx: ±4,9 м; Δl: 0,35-20 м.
TP-LV-P600		Гелий-неоновый точечный портативный	Δf: 0-3 МГц; Δv: ±12 м/с; Δx: ±2 м; Δl: 0,35-20 м.
TP-LV-P800		Инфракрасный точечный портативный	Δf: 0-3 МГц; Δv: ±30 м/с; Δx: ±4,9 м; Δl: 0,35-20 м.
LV-M300		Инфракрасный точечный портативный (твердотельный)	Δf: 0-3 МГц; Δv: ±7 м/с; Δx: ±0,5 м; Δl: 0,1-20 м.

В таблице 1 приведены лазерные доплеровские виброметры точечного и сканирующего типов. Перечисленные модели позволяют измерять параметры вибрации в локальной точке, а также выстраивать профили вибрации (виброграммы), отображающие распределение колебаний на поверхности исследуемого объекта. Результатом исследования являются амплитудно-временные зависимости вибрации, амплитудно-частотные спектры и виброграммы. Анализ данных позволяет определять вибрационные характеристики изделий, их собственные формы и частоты колебаний, а также верифицировать конечно-элементные модели конструкций и проводить их неразрушающие испытания.

В настоящей работе методом ЛДВ проведено исследование вибрации элементов квадрокоптера. Вибрации двигателей измерялись с помощью точечного лазерного виброметра TP-LV-P600 (VLESS, КНР), а вибрации корпуса БПЛА контролировали с использованием с использованием сканирующего лазерного виброметра TP-LSV-500 (VLESS, КНР). Струк-

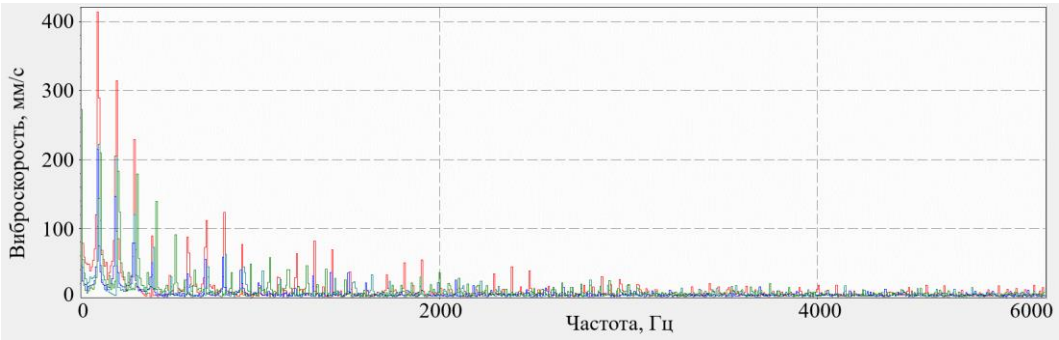
турная схема (рис.1 а) и фотография (рис.1 б) лабораторной установки приведены на рисунке 1.

(а) (б)

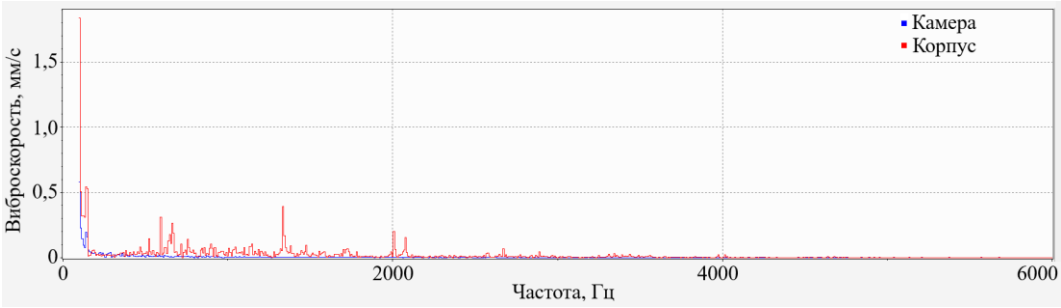
Рис.1. Структурная схема (а) и фотография (б) лабораторной установки лазерной виброметрии для измерения вибрации корпуса, двигателей и других элементов квадрокоптера

В рамках настоящего исследования лазерное сканирование проводилось в диапазоне частот от 50 Гц до 6 кГц с шагом 2 Гц. Результатами сканирования являются амплитудно-частотные спектры колебаний корпуса квадрокоптера, а также виброграммы, отражающие распределение амплитуды колебаний на поверхности устройства. Анализ амплитудно-частотного спектра вибрации позволил определить рабочие частоты и формы колебаний квадрокоптера. На рисунке 2 приведены амплитудно-частотные спектры, отражающие усредненные значения колебаний на двигателях (*а*), корпусе и камере квадрокоптера (*б*).

В настоящем исследовании измерения вибраций проводили таким образом, чтобы совместить ось сканирующей головки одноканального виброметра с осью вращения ротора.



(а)

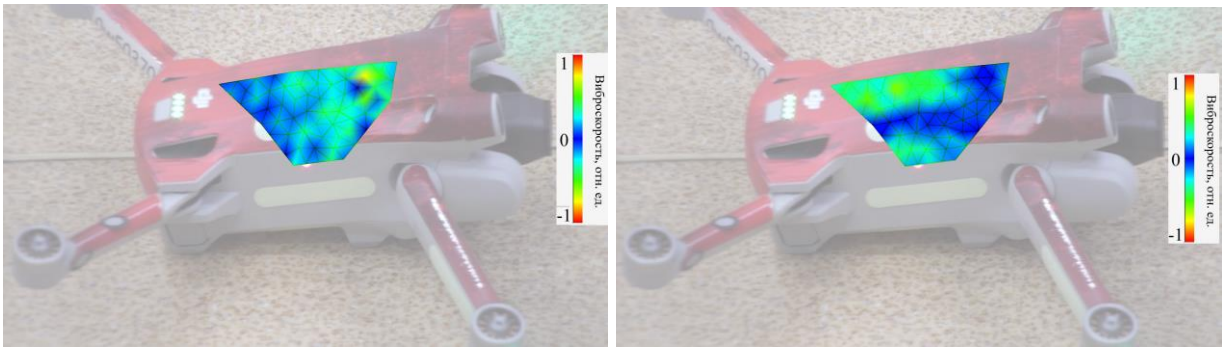


(б)

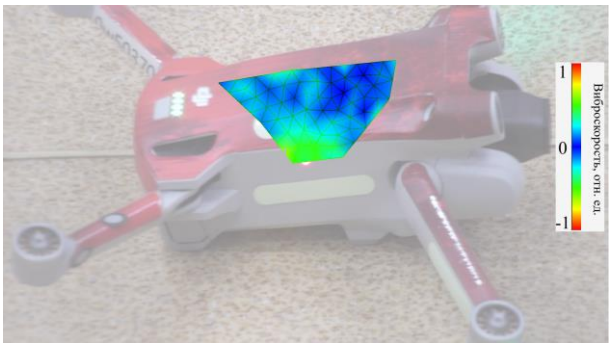
Рис. 2. Амплитудно-частотные спектры колебаний на двигателях (*а*), корпусе и камере квадрокоптера (*б*)

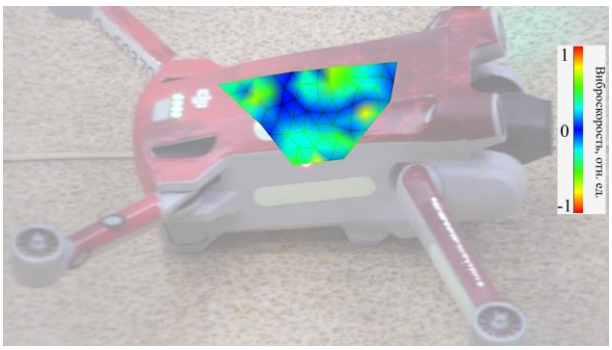
Как видно из рис.2 (а), вибрации двигателей имеют аналогичный спектральный состав, но различаются по амплитуде. Максимальная амплитуда вибрации зарегистрирована на правом нижнем двигателе (красный цвет на спектре) и составляет около 400 мм/с. Указанная величина примерно в 2 раза больше аналогичных значений, измеренных на трех других двигателях БПЛА. Полученные данные позволили обнаружить дефект в виде трещины на указанной паре лопастей БПЛА, после чего эксплуатационный дефект был устранен. Важно отметить, что полученные данные могут быть использованы для оценки вибрационного воздействия винтомоторной группы на полетный контроллер БПЛА, а также другие его элементы.

На рисунке 3 ниже приведены результаты лазерного сканирования корпуса квадрокоптера при тестовом запуске работы двигателей.

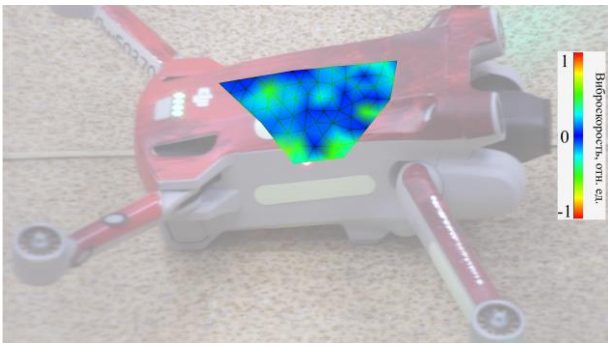


(а) (б)





(в) (г)



(д)

Рис. 3. Виброграммы, отображающие колебания корпуса квадрокоптера на следующих частотах: (*а*) – 50 Гц, (*б*) – 1369 Гц, (*в*) – 1409 Гц, (*г*) – 1739 Гц, (*д*) – 2059 Гц.

Из приведенных на рисунке 3 виброграммах видно распределение вибрации на корпусе квадрокоптера на различных частотах в диапазоне от 50 до 2059 Гц. Данные частоты являются высшими гармониками от основной частоты вращения двигателей и отображают вибрации корпуса БПЛА на рабочих режимах устройства. Максимальная амплитуда колебаний крышки БПЛА определена на основной частоте вращения двигателей (50Гц) и составляет 0,85 мм/с. На частоте 1369 Гц также наблюдались локальные зоны на корпусе устройства, на которых измеренная амплитуда виброскорости достигала 0,43 мм/с. Амплитуда виброскорости на боковой поверхности корпуса достигала 0,3 мм/с на частоте 1409 Гц. Полученные данные могут быть использованы для оценки вибрации БПЛА в сборе и определения зон с пониженной жесткостью, а также обнаружения дефектов в составных частях конструкции.

Заключение

В рамках настоящей работы методом лазерной доплеровской виброметрии проведено исследование вибрации на корпусе и двигателях квадрокоптера DJI mini 3. В ходе работы определены вибрационные характеристики двигателей, что позволило выявить

дефект на одной из пар винтов БПЛА. Показана возможность применения бесконтактных лазерных доплеровских виброметров для оценки вибрационного воздействия винтомоторной группы на полетный контроллер БПЛА, а также других его элементов. В результате лазерного сканирования корпуса квадрокоптера определены формы колебаний устройства, соответствующие рабочим частотам двигателей. Показана возможность определения областей с пониженной жесткостью на поверхности БПЛА.

Список литературы

1 Gwashavanhu B., Oberholster A. J., Heyns P. S. Rotating blade vibration analysis using photogrammetry and tracking laser Doppler vibrometry // Mechanical Systems and Signal Processing, Volumes 76–77, August 2016, Pages 174-186

2 Castellini P., Santolini C. Vibration measurements on blades of a naval propeller rotating in water with tracking laser vibrometer // Measurement 24 (1998) 43–54