

В. Г. Главный^{1}, Г. В. Бакакин¹, С. В. Двойнишников¹, Д. В. Куликов¹*

Измерение характеристик калибровочной платформы КЛАД-1

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: glavny@ngs.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы измерения характеристик калибратора КЛАД-1 для калибровки лазерных доплеровских анемометров (ЛДА). Предложен способ оценки статистических характеристик калибратора, который может использоваться для настройки и технического контроля. Показана возможность использования КЛАД-1 в качестве калибратора ЛДА в составе первичного эталона единицы скорости воздушного потока.

Ключевые слова: лазерный доплеровский анемометр, калибровка

V. G. Glavnyi^{1}, G. V. Bakakin¹, S. V. Dvoynishnikov¹, D. V. Kulikov¹*

Estimation Quality of the Calibration Platform KLAD-1

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: glavny@ngs.ru

Abstract. The issues of measuring the characteristics of the KLAD-1 calibrator for laser Doppler anemometers (LDA) are considered. A method is proposed for estimating of the statistical characteristics, that can be useful for adjustment and acceptance test. It is shown the possibility of using KLAD-1 as an LDA calibrator as a part of the primary standard of the unit of air flow velocity.

Keywords: laser Doppler anemometer, calibration

Введение

Национальный первичный эталон единицы скорости воздушного потока является основой для калибровки приборов измерения воздушной скорости, таких как статические трубки Пито и анемометры (ЛДА, PIV, ультразвуковые и другие измерители). Сам первичный эталон состоит из двух частей: высококачественной аэродинамической трубы и стандарта измерения воздушной скорости. Для измерения и передачи единицы вторичным эталонам в диапазоне от 10 до 100 м/с используют приемники полного и статического давления (трубка Пито), а для диапазона от 0,05 до 25 м/с используют лазерный доплеровский анемометр (ЛДА) [1, 2].

Перед измерением, лазерный анемометр калибруется путем сопоставления показаний скорости ЛДА с известной скоростью вращающегося диска. Этот диск имеет известные размеры и скорость вращения, а ЛДА измеряет линейную скорость контрольных точек на этом диске. Такая калибровочная процедура связывает единицу скорости воздушного потока с основными единицами стандарта СИ: длина (метр) и время (секунда) [1–3].

Качество калибровки ЛДА зависит от многих факторов. Основными источниками неопределенности являются: вариации скорости вращения, погрешности радиуса вращения контрольных точек, осевые колебания диска, угловые ошибки между системой координат внутри ЛДА и осью вращения калибровочного диска, дрейф скорости вращения диска и зависимость показаний ЛДА от окружающих условий (температура, влажность, давление) [2].

В состав национального первичного эталона единицы скорости воздушного потока входит калибратор КЛАД-1 №01, который используется для определения коэффициента преобразования измерителя ЛАД-015 в диапазоне скоростей воздушного потока от 0,05 до 12 м/с [1]. КЛАД-1 это калибровочная платформа на основе вращающегося диска для диапазона скоростей от 0,5 до 25 м/с, со среднеквадратичным отклонением скорости менее 0,01%.

Существующие методики калибровки ЛДА основываются на сопоставлении показаний ЛДА и измеренной скорости вращения диска. Скорость вращения измеряется с помощью частотомера высокого класса, с погрешностью измерения не хуже 0,0001 % [2]. При этом предполагается, что мгновенная скорость вращения постоянна, не зависит от выбранной точки на диске, что важно для калибровки ЛДА. Для измерения вариаций и стабильности скорости вращения можно использовать специализированные анализаторы фазового шума, используемые для поверки эталонных генераторов сигналов.

В данной работе рассматривается внутренняя методика измерения характеристик КЛАД-1, которая позволяет оценить статистические характеристики, влияющие на качество калибровки ЛДА.

Описание калибровочной платформы КЛАД-1

КЛАД-1 – это калибровочная платформа ЛДА с вращающимся диском. Она обеспечивающую диапазон скоростей от 0,5 до 25 м/с при среднем отклонении скорости менее 0,01 % [4]. Блок-схема КЛАД-1 показана на рис. 1. Она включает: прецизионную систему вращения с двумя дисками фиксированного радиуса; трехфазный векторный контроллер синхронного двигателя с постоянными магнитами; магнитный энкодер; модуль управления с интерфейсом USB; высокоскоростной оптический датчик оборотов. Магнитный энкодер используется как мгновенный датчик угла и скорости для управления двигателем. Выход оптического датчика оборотов (тахометр) используется для измерения скорости вращения диска и сопоставления с показаниями ЛДА.

В качестве основы был выбран 3,5-дюймовый компьютерный жесткий диск с диаметром пластины 95 мм, скоростью вращения 7200 об/мин, низким уровнем шума и заявленным временем безотказной работы (MTBF) не менее 1 млн часов. Такой диск имеет отличные характеристики: минимальный дисбаланс и минимальную осевую вибрацию. Ось диска совмещена с осью ротора двигателя. Ось ротора опирается на гидродинамические подшипники, а статор двигателя состоит из 6-полюсной пары, что вместе с векторным управлением сводит к минимуму пульсации вращающего момента.

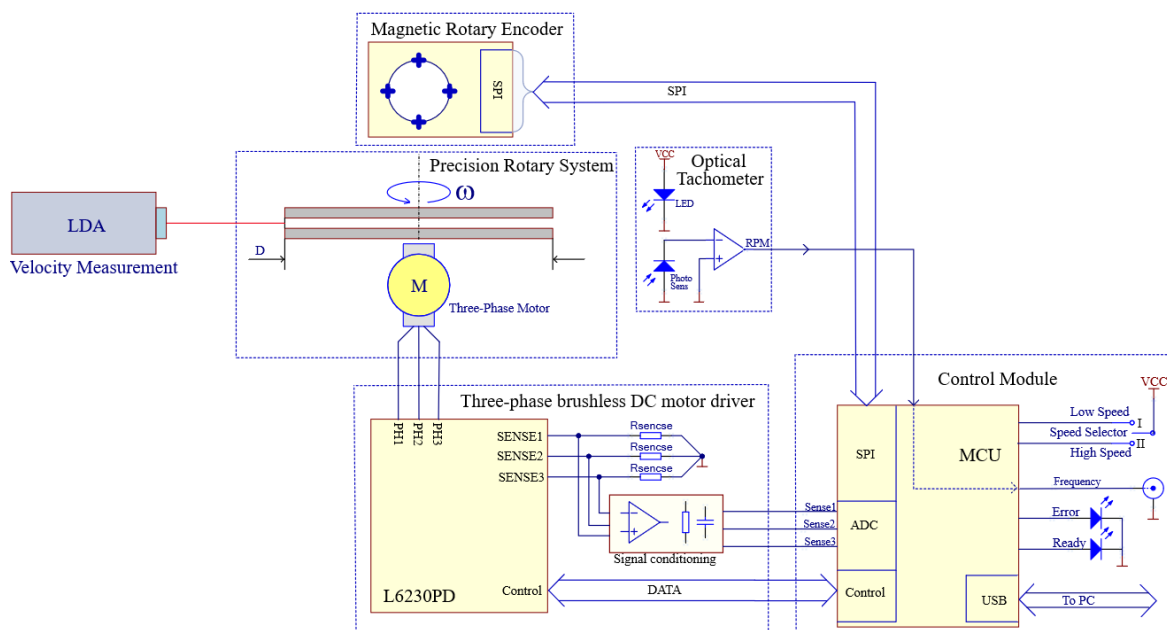


Рис. 1. Блок-схема КЛАД-1

В современных механических дисках (HDD) используются векторные алгоритмы управления двигателем и идеальная конструкция двигателя и дисков. Это позволяет точно позиционировать записывающие головки и достигать высокой плотности записи. Именно поэтому HDD был выбран как основа для калибровочной платформы КЛАД-1. Но в HDD дисках важную роль играет высокий момент инерции вращения дисков. Момент инерции играет роль фильтра, который подавляет высокочастотные вариации скорости вращения, компенсируя помехи в измерительных цепях и ограниченную скорость регулирования. Контроллеры HDD оптимизированы под скорость вращения 5400 и 7200 об/мин.

В отличие от HDD, платформа КЛАД-1 должна вращать диски в широком диапазоне скоростей, обеспечивать стабильную скорость вращения в диапазоне от 600 до 7200 об/мин. Но со снижением скорости вращения снижается инерция вращения, и снижается противоэлектродвижущая сила, используемая для мгновенной оценки положения ротора. Поэтому для плавного регулирования скорости был разработан специальный контроллер. Он имеет все необходимые аппаратные блоки для управления бесколлекторным двигателем: трехфазный ШИМ, быстродействующие асинхронные АЦП и ЦАП, быстродействующие компараторы, и встроенные усилители сигналов. Для управления скоростью вращения используется векторный алгоритм Field Oriented Control (FOC) управления током обмоток. Алгоритм FOC использует преобразования Кларка и Парка с двойным контуром автоматического регулирования для управления крутящим моментом и магнитным потоком, и еще один контур для автоматического управления скоростью [5].

Мгновенное положение ротора оценивается с помощью датчика противоэлектродвижущей силы (back EMF) и квадратурного энкодера на основе эффекта Холла с разрешением $0,05^\circ$, нелинейность $\pm 1^\circ$. Скорость вращения контролируется

ется оптическим датчиком оборотов. Датчик оборотов – это инкрементальный энкодер на отражении [5]. Штрихи энкодера нанесены на поверхность пластины магнитного HDD диска. Каждый штрих можно интерпретировать как щелевую апертуру на диске, которая модулирует сигнал фотоприемника. Общий принцип работы энкодера показан на рис. 2. Фокусированный свет попеременно отражается от поверхности диска и от штрихов, а принимаемый отраженный сигнал модулируется вращением диска.

Измерение характеристик калибровочной платформы

Для оценки вариаций скорости вращения, вносимых контроллером двигателя, измерялись отклонения скорости в диапазоне скоростей от 600 до 4800 об/мин. Для анализа вариаций скорости вращения записывался сигнал с выхода оптического датчика, из которого выделялись штрихи и время между ними. Частота дискретизации сигнала равна 8 МГц, стабильность тактовой частоты не хуже 0,0005 %. На рис. 3 показан сигнал на выходе фотоприемника от одного штриха.

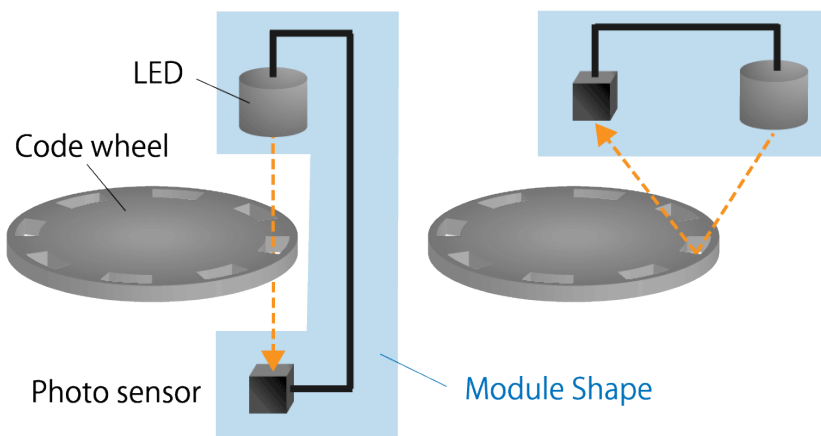


Рис. 2. Оптический энкодер, слева на проходящем свете, справа на отраженном свете [5]

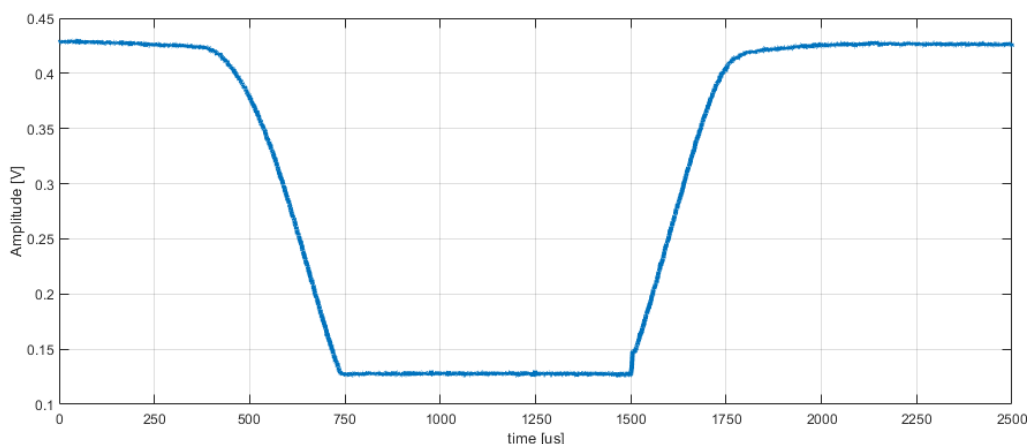


Рис. 3. Сигнал на выходе фотоприемника от одного штриха на скорости вращения 300 об/мин, оцифрованный на частоте 1 МГц

Штрихи выделялись с помощью алгоритма согласовано-избирательной фильтрации фронта сигнала [6], параметризованного средней скоростью вращения диска. Результаты измерений приведены в табл. 1, отклонение скорости вращения указано в единицах ppm (0,01 % составляет 100 ppm). Эти же результаты показаны на рис. 4.

Во всем диапазоне, измеренная скорость отличается от номинальной на 0,1–0,7%. По видимому, это смещение может быть вызвано ошибками округления в арифметике Q1.15 с фиксированной точкой, которая используется в алгоритмах управления двигателем. Измеренное смещение скорости не влияет на калибровку ЛДА, так как показания ЛДА сопоставляются с фактической скоростью вращения.

Таблица 1

Результаты измерений

Скорость вращения, об/мин	Измеренная скорость, об/мин	Среднеквадратичное отклонение, ppm	Разброс показаний, ppm
600	603,95	97	433
900	902,61	44	241
1200	1205,61	23	141
1800	1803,26	22	120
3000	3007,94	35	200
4200	4207,23	43	175
4800	4804,15	47	182

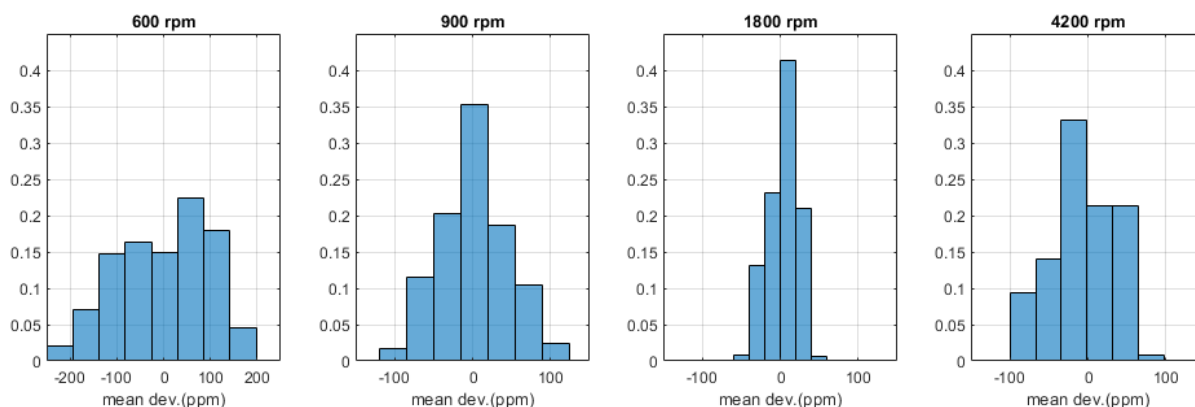


Рис. 4. Измеренное распределение скорости вращения для номинальных скоростей 600, 900, 1800, 4200 об/мин.

Обсуждение

Для всех значений скорости измеренное отклонение не превышает 0,01 %. Полный диапазон отклонений в 4–6 раз больше расчетного стандартного отклонения. Измеряемое отклонение зависит от значения средней скорости вращения,

минимум находится в диапазоне от 1200 до 1800 об/мин. На малой скорости вращения диска значения отклонения скорости от среднего увеличивается из-за ослабленного контроля над током двигателя. При этой скорости коммутационные переходные процессы в обмотках двигателя преобладают над средним током обмотки. Это вносит ошибки в алгоритмы управления магнитным потоком и крутящим моментом. При увеличении скорости вращения до 4200 об/мин уменьшается количество периодов регулирования на один оборот диска. На такой высокой скорости вращения цикл регулирования скорости выполняется всего 6 раз на один оборот диска, что приводит к грубой дискретизации скорости вращения. Несмотря на зависимость отклонений скорости от ее среднего значения, измеренные средние отклонения лежат в пределах допустимой погрешности 0,01 %.

Заключение

Калибровочная платформа КЛАД-1 обеспечивает необходимый уровень стабильности скорости вращения диска, с вариациями, не превышающими 0,01 %. Достигнутая неопределенность скорости позволяет использовать КЛАД-1 для калибровки ЛДА с заданной точностью.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, К. В. Государственный первичный специальный эталон единицы скорости воздушного потока ГЭТ 150-2012 / К. В. Попов, С. А. Поликарпов, Ю. А. Чистяков // Измерительная техника. – 2014. – № 8. – С. 3–4.
2. T.T. Yeh and J. M. Hall Airspeed calibration service // NIST Special Publication 250-79. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.250-79>.
3. I. I. Shinder, C.J. Crowley, B. J. Filla, M. R. Moldover Improvements to NIST's air speed calibration service // Proceedings of the 16th International Flow Measurements Conference, Paris, September 24-26, 2013. URL: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.11.005>.
4. Главный В.Г., Рахманов В.В., Двойнишников С.В., Кротов С.В., Меледин В.Г. Контроллер калибровочной платформы лазерного доплеровского измерителя скорости // Тезисы докладов VI Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ2021) с элементами школы молодых ученых, Севастополь, Республика Крым, 22–29 августа 2021. – С. 212.
5. Principle and advantages of optical encoder, URL: <https://www.akm.com/eu/en/products/rotation-angle-sensor/tutorial/optical-encoder/>
6. Фурман Я. А., Кривецкий А. В., Передреев А. К., и др. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов // Физматлит, 2003. – С.592.

© В. Г. Главный, Г. В. Бакакин, С. В. Двойнишников, Д. В. Куликов, 2023