



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование возможности применения датчика Холла для
измерения направления ветра»

Исполнитель Пудков Алексей Иванович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Симакина Татьяна Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой



(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

« 25 » мая 2026 года

Санкт-Петербург
2026

Оглавление

Введение	3
Задачи исследования:	3
1. ПЕРВАЯ ГЛАВА	4
1.1 Ветер как метеорологическая величина и объект измерений.....	4
1.2 Методы и технические средства измерений.....	6
1.3 Условия проведения измерений.....	6
1.4 Классификация флюгеров и их метрологические характеристики.....	7
1.5 Общие метрологические и динамические требования (стандарты ВМО)..	9
1.6 Обзор современных метеорологических систем и проблемы их эксплуатации в РФ.....	12
1.7 Выводы по главе 1	14
2. ВТОРАЯ ГЛАВА.....	16
2.1 Физическая природа эффекта Холла и эволюция его исследований	16
2.2 Теоретическая основа работы датчиков Холла и влияние внешних факторов.	17
2.3 Принцип работы магнитных энкодеров и их сравнение с другими датчиками угла.....	21
2.4 Сравнение с другими типами датчиков угла в метеорологии	23
2.5 Обоснование выбора датчика AS5600 как объекта исследования	25
2.6 Выводы по главе 2	28
3. ТРЕТЬЯ ГЛАВА.....	30
3.1 Выбор компонентов и обоснование	30
3.2 Аппаратная часть. Схема подключения, схема расположения элементов и сборка.	34
3.3 Лабораторные испытания.....	47
3.4 Выводы по главе 3	57
Заключение.....	58
Итоговый вывод по работе	58
Направления дальнейшей работы.....	59
Список литературы	59

Введение

Актуальность темы. В современной метеорологии и автоматизированных системах мониторинга окружающей среды точное измерение параметров ветра является критически важной задачей. Традиционные механические флюгеры часто сталкиваются с проблемами износа контактных узлов, ограниченной точности и влияния помех. Использование современных бесконтактных методов измерения, в частности на основе магнитного эффекта Холла, позволяет создать надежные, долговечные и высокоточные датчики направления ветра. Датчик AS5600 представляет собой перспективное решение благодаря своей способности обеспечивать высокое разрешение и помехозащищенность при низкой стоимости, что делает исследование возможностей его применения для метеорологических целей актуальным.

Цель работы — исследование и разработка прототипа системы измерения направления ветра на базе магнитного датчика Холла AS5600, а также оценка его точностных и эксплуатационных характеристик.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих методов и средств измерения параметров ветра.
2. Изучить физические принципы работы датчика Холла AS5600 и его технические характеристики.
3. Разработать схемотехническое решение и конструкцию измерительного модуля.
4. Провести экспериментальную оценку точности и стабильности работы датчика в различных условиях.
5. Выявить ограничения текущей реализации и определить пути совершенствования устройства.

Объект исследования — процессы измерения углового положения объектов в метеорологических приборах.

Предмет исследования — метрологические и эксплуатационные характеристики датчика AS5600 при его использовании в составе автоматизированного измерителя направления ветра.

1. ПЕРВАЯ ГЛАВА

1.1 Ветер как метеорологическая величина и объект измерений

Ветер в метеорологии рассматривается как векторная величина, характеризующая движение воздушных масс относительно земной поверхности [8]. С физической точки зрения он описывается набором параметров, включающим модуль вектора (скорость) и его пространственную ориентацию (направление). Хотя в трехмерном пространстве ветер имеет три составляющие (зональную, меридиональную и вертикальную), в стандартной наземной метеорологии основной акцент делается на горизонтальном векторе, так как вертикальные перемещения обычно на порядок меньше, за исключением зон конвекции или сложного рельефа [9].

Ветер возникает под действием градиента атмосферного давления (барического градиента), силы Кориолиса, силы трения о подстилающую поверхность и орографических факторов. Основные типы ветра в метеорологии:

1. Геострофический ветер — теоретический ветер, параллельный изобарам, при котором сила барического градиента уравновешена силой Кориолиса.
2. Градиентный ветер — учитывает кривизну изобар (циклоны, антициклоны).

3. Термический ветер — разность геострофических ветров на разных высотах, связанная с горизонтальным градиентом температуры.
4. Местные ветры — бриз, горно-долинный, фён, бора и др.
5. По высоте выделяют:
6. приземный ветер (до 10 м — стандартная высота измерения),
7. ветер на высотах АМК (850, 700, 500 гПа и др.).
8. По шкале Бофорта ветер классифицируется от 0 баллов (штиль) до 12 баллов (ураган).

При проведении метеорологических наблюдений измеряются следующие параметры:

1. Направление ветра: определяется как азимут точки, откуда дует поток. Отсчитывается в градусах от истинного севера по часовой стрелке ($0^{\circ}/360^{\circ}$ — север, 90° — восток, 180° — юг, 270° — запад) [8, 9]
2. Скорость ветра: скалярная величина, равная пути, проходимому объемом воздуха за единицу времени. Основная единица — метры в секунду (м/с), однако в авиации используются км/ч, а в морской навигации — узлы [8, 1, 2].
3. Усредненные величины: для синоптических целей значения усредняются обычно за 10 минут. Периоды менее нескольких минут не позволяют эффективно сгладить естественные турбулентные пульсации [1, 2].
4. Пиковые порывы: максимальная скорость ветра, наблюдавшаяся за определенный интервал. ВМО рекомендует регистрировать порывы продолжительностью около 3 секунд, так как они критичны для оценки нагрузок на здания и сооружения [1, 2].
5. Характеристики изменчивости: включают средние квадратические отклонения скорости и направления, позволяющие оценить турбулентность потока [1].

1.2 Методы и технические средства измерений

Методы измерения параметров ветра варьируются от субъективных оценок до высокотехнологичных автоматизированных систем:

1. Визуальная оценка (шкала Бофорта): применяется при отсутствии приборов. Система разделена на 12 баллов (от штиля до урагана), основываясь на признаках воздействия на наземные объекты или море [8, 2].
2. Простые механические приборы: классическим примером является флюгер Вильда (модели ФВЛ с легкой и ФВТ с тяжелой доской). Направление определяется по флюгарке, а скорость — по углу отклонения металлической доски от вертикали [3].
3. Анемометры: наиболее распространены чашечные (для измерения скорости) и крыльчатые (пропеллерные) приборы. Угловая скорость их вращения пропорциональна скорости ветра [2].
4. Ультразвуковые (акустические) системы: современные комплексы, такие как АМК-03, измеряют время прохождения ультразвуковых сигналов между парами датчиков. Это позволяет вычислять трехкомпонентный вектор скорости и акустическую температуру воздуха без использования движущихся частей, обеспечивая мгновенную реакцию на порывы [4].
5. Потенциометрические датчики:
6. Измерение ветра на высотах: осуществляется с помощью радиозондов, траектория которых отслеживается радионавигационными системами (ГНСС/GPS) или радиолокаторами [2].

1.3 Условия проведения измерений

Для обеспечения репрезентативности данных установлены строгие требования к размещению приборов:

1. Стандартная высота: измерительные датчики должны располагаться на высоте 10 метров над открытой ровной поверхностью [2].

2. Открытость площадки: расстояние от анемометра до любого препятствия должно минимум в 10 раз превышать высоту этого препятствия [9, 2].
3. Шероховатость поверхности: окружающая территория документируется для учета влияния трения о почву и растительность на профиль ветра [2].

Согласно нормам ВМО и российским стандартам (например, РД 52.04.562-97), установлены следующие требования к точности:

1. Допустимая погрешность по скорости: $\pm 0,5$ м/с (для скоростей до 5 м/с) или $\pm 10\%$ (свыше 5 м/с) [2].
2. Допустимая погрешность по направлению: $\pm 5^\circ$ (или $\pm 10^\circ$ в авиационных правилах РФ) [2].
3. Межповерочный интервал для средств измерений обычно составляет 1 год [2].

1.4 Классификация флюгеров и их метрологические характеристики

Флюгер является основным прибором для измерения направления ветра в гидрометеорологии. В зависимости от принципа действия и конструкции флюгеры подразделяются на несколько типов, каждый из которых обладает характерными метрологическими характеристиками и эксплуатационными особенностями. Классификация флюгеров позволяет оценить их применимость в различных климатических условиях и задачах наблюдений.

Механические флюгеры (Визуальные)

Традиционные устройства, где положение флюгарки и отклонение доски оцениваются наблюдателем визуально.

Флюгер Вильда (модели ФВЛ и ФВТ): это классический прибор для одновременного измерения направления и скорости ветра.

Принцип действия: направление определяется по положению флюгарки относительно 8 ориентированных по сторонам света штифтов. Скорость измеряется по углу отклонения металлической доски, закрепленной на горизонтальной оси [3].

Разновидности: ФВЛ (легкая доска) имеет массу пластины около 200 г и диапазон измерения скорости 1–20 м/с. ФВТ (тяжелая доска) с массой пластины около 800 г применяется для скоростей 4–40 м/с [3, 5].

Особенности: приборы автономны и надежны, но обладают низкой дискретной точностью из-за субъективности визуального считывания. Порог чувствительности по скорости составляет около 1,0 м/с для ФВЛ и 4,0 м/с для ФВТ.

Электромеханические флюгеры

В этих приборах механическое перемещение флюгарки преобразуется в электрический сигнал (напряжение, сопротивление или импульс).

Анеморумбометр М-63М-1: является основным рабочим инструментом метеосети РФ [7].

Метрологические характеристики: диапазон направления – 0–360°, диапазон скорости – 1,2–40 м/с (для средней) и до 60 м/с (для мгновенной) [7].

Погрешность: по направлению составляет $\pm 10^\circ$, по скорости – $\pm (0,5 + 0,05V)$. Порог чувствительности – около 0,8–1,2 м/с [7].

Технологии: датчик направления часто реализуется на базе многооборотного потенциометра (сопротивление 0–10 кОм соответствует азимуту) или системы герконов [7].

Электронные и акустические системы (Бесконтактные)

Современные комплексы, лишённые механической инерции и износа, обеспечивающие высокую частоту обновления данных [1].

Ультразвуковые системы (например, АМК-03):

Принцип действия: измерение временных интервалов прохождения ультразвука между парами датчиков, что позволяет вычислять трехкомпонентный вектор скорости [4].

Метрологические характеристики: погрешность по направлению – $\pm 4^\circ$ (или $\pm 2...2,5^\circ$ у зарубежных аналогов Vaisala). Порог чувствительности чрезвычайно низок – от 0,01 до 0,1 м/с [4].

Разрешение: способность фиксировать изменения направления до $0,01^\circ$ [7].

Дистанционные методы: LIDAR, SODAR и радары позволяют измерять профиль ветра на высотах, используя рассеяние электромагнитных или звуковых волн [2].

1.5 Общие метрологические и динамические требования (стандарты ВМО)

Согласно наставлениям ВМО и государственным стандартам, флюгеры должны отвечать следующим параметрам:

1. Высота установки: стандартно – 10 метров над открытой ровной поверхностью [2].
2. Климатическая устойчивость: рабочий диапазон температур для профессиональных систем – от -50 до $+50^\circ\text{C}$ (для модели АМК-03 – до -60 или даже -70°C) [4].

Требования нормативных документов к измерению направления ветра

Измерение направления ветра в гидрометеорологии строго регламентировано национальными и международными нормативными документами. Эти требования определяют метрологические характеристики приборов, методики наблюдений, условия размещения датчиков и допустимые погрешности, обеспечивая сопоставимость данных на глобальном и национальном уровнях.

Российские нормативные документы

В Российской Федерации ключевыми документами, регламентирующими измерения ветра, являются руководящие документы (РД) и государственные стандарты (ГОСТ):

РД 52.04.562-97: является основополагающим документом, устанавливающим нормы точности и методики наблюдений [2]. Для современных цифровых систем (например, АМК-03) предел абсолютной погрешности измерения направления не должен превышать $\pm 4^\circ$ [4].

Федеральные авиационные правила (Приказ Минтранса № 60): устанавливают требования для обеспечения полетов в соответствии со стандартами ИКАО. Согласно им, требуемая точность измерения средней величины приземного ветра по направлению составляет $\pm 10^\circ$ [5].

ГОСТ 15150-69: определяет климатическую устойчивость оборудования (категория ХЛ 1), требуя сохранения работоспособности при температурах от -60°C до $+40^\circ\text{C}$ и влажности 100% [1].

Методики поверки: метрологическая поверка средств измерений является обязательной и проводится с интервалом в 1 год на специализированных аэродинамических установках [7].

Международные нормативные документы

Международная практика опирается на наставления Всемирной метеорологической организации (ВМО) и требования ИКАО:

3. WMO-No. 8 (Руководство ВМО № 8):
4. Погрешность: требуемая неопределенность измерения направления составляет 5° [1].
5. Порог чувствительности: для оперативных наблюдений на станциях порог по направлению не должен превышать 0,5 м/с [5].
6. Динамические характеристики: степень затухания (damping ratio) флюгера должна находиться в пределах 0,3–0,7 для минимизации

«рыскания» прибора. Путь синхронизации (distance constant) не должен превышать 5 метров [1, 5].

7. Осреднение: стандартные интервалы усреднения данных составляют 2 и 10 минут.
8. ИКАО (ICAO) Annex 3:
9. Размещение: датчики устанавливаются на высоте 10 ± 1 м над поверхностью земли [5].
10. Частота обновления: при использовании автоматизированных систем (АМИС) данные должны обновляться каждые 60 секунд.

Проблемы соблюдения требований в реальных условиях

Соблюдение нормативных требований часто затруднено из-за внешних факторов:

1. Обледенение: в Арктике и Сибири намерзание льда блокирует механические флюгеры и нарушает работу ультразвуковых датчиков, что требует мощных систем обогрева [4, 8].
2. Влияние рельефа и препятствий: любые объекты в радиусе 100 метров искажают поток. Расстояние до препятствия должно минимум в 10 раз превышать его высоту, иначе погрешность может достигать 25% и выше [2, 11].
3. Коррозия: в морских условиях соляной туман быстро разрушает незащищенные детали, требуя использования нержавеющей стали и специальных полимеров [8, 4].
4. Смазочные материалы: застывание смазки при морозах может резко увеличить порог чувствительности (с 0,5 до 3–5 м/с), делая прибор бесполезным при слабом ветре [4, 10].

1.6 Обзор современных метеорологических систем и проблемы их эксплуатации в РФ

Современные системы измерения параметров ветра в Российской Федерации находятся в стадии глубокой технологической трансформации – от классических механических приборов к цифровым автоматизированным комплексам. Этот переход регламентируется как международными стандартами ВМО (WMO-No. 8), так и российскими руководящими документами (например, РД 52.04.562-97), которые устанавливают жесткие требования к точности и репрезентативности данных.

Автоматизированные метеорологические комплексы (АМК) и российские разработки

Основу современной российской микрометеорологии составляет ультразвуковая станция АМК-03 (разработка ИМКЭС СО РАН) [1, 8]. В отличие от традиционных приборов, её работа основана на акустическом методе – измерении временных интервалов прохождения ультразвука между четырьмя парами пьезоэлектрических преобразователей.

Метрологические преимущества и характеристики АМК-03:

1. Высокая точность: предел абсолютной погрешности по направлению составляет $\pm 4^\circ$, по скорости – $\pm(0,1 + 0,02V)$ м/с [5, 6].
2. Низкий порог чувствительности: прибор способен фиксировать движение воздуха от 0,01 м/с, что значительно превосходит возможности механических систем [12, 6].
3. Отсутствие инерции: благодаря отсутствию движущихся частей система мгновенно реагирует на порывы, что позволяет вычислять параметры турбулентности (энергию флуктуаций, потоки тепла и импульса) [6].
4. Многофункциональность: станция одновременно регистрирует температуру (до -50°C , с решениями для расширения до -70°C), давление и влажность [4, 6].

5. Надежность: среднее время наработки на отказ составляет не менее 10 000 часов, а срок службы – не менее 6 лет [4, 7].

Импортные системы и вопрос технического суверенитета

На сети станций РФ, особенно в аэропортах и арктических НИИ, широко применяются системы мировых лидеров, таких как Vaisala (серии WMT700, WXT530) [1].

Характеристики: Импортные ультразвуковые датчики обеспечивают высокую точность (погрешность направления $\pm 2...2,5^\circ$) и широкий диапазон скоростей (до 75 м/с) [1].

Проблемы эксплуатации: Основными барьерами являются высокая стоимость и зависимость от зарубежного сервиса и запчастей в текущих геополитических условиях. Приоритетным направлением развития признан переход на отечественные аналоги (АМК-03, МААС) [1].

Проблемы эксплуатации метеостанций в России

Эксплуатация оборудования на территории РФ осложнена рядом факторов, требующих специальных технических решений:

Обледенение и экстремальный холод:

1. В арктических зонах намерзание льда блокирует механические флюгеры и нарушает работу ультразвуковых излучателей [1].
2. Для борьбы с этим требуются мощные системы интеллектуального обогрева, что критично для автономных станций (ТДС) с ограниченным энергоснабжением [13, 14].
3. Застывание смазки в механических узлах при морозах может увеличить порог чувствительности с 0,5 до 3–5 м/с, делая прибор бесполезным при слабом ветре [10].
4. Износ и устаревание парка:
5. В сети всё еще использует приборы советского периода, такие как флюгеры Вильда (ФВЛ/ФВТ) и анеморумбометры М-63М [17].

6. Механические системы имеют высокий порог трогания (0,8–1,2 м/с) и подвержены износу подшипников [8].
7. Логистические и метрологические сложности:
8. Доставка запчастей на труднодоступные станции может занимать от 3 до 12 месяцев [16, 14].
9. Государственная поверка современных ультразвуковых датчиков требует наличия специализированных аэродинамических труб, количество которых ограничено [16, 4].
10. Коррозия: В морских условиях (платформы, суда) соляной туман быстро разрушает алюминиевые и стальные детали, требуя применения нержавеющей стали и полимеров [7].

Программа цифровизации до 2030 года направлена на создание гибридной сети наблюдений, где ключевые узлы (аэропорты, порты) будут оснащены высокоточными ультразвуковыми комплексами с дублированием, а опорная сеть в удаленных районах — модернизированными отечественными датчиками с низким энергопотреблением.

1.7 Выводы по главе 1

Проведённый анализ теоретических основ эффекта Холла, принципов работы магнитных энкодеров и современных методов измерения направления ветра позволяет сформулировать следующие выводы.

Ветер как метеорологическая величина характеризуется высокой изменчивостью и требует прецизионных методов измерения, особенно в условиях турбулентности, обледенения и экстремальных температур. Традиционные механические флюгеры (Вильде, Фусса, М-63М-1) и электромеханические (потенциометрические) приборы, несмотря на широкое распространение в сети наблюдений Росгидромета, обладают существенными недостатками:

1. Значительная инерционность и высокий порог чувствительности (0,8–2,0 м/с);
2. Наличие «мёртвой зоны» в районе 360° у потенциометрических систем;
3. Низкая устойчивость к обледенению, коррозии и механическому износу, что приводит к частым простоям в зимний период и в арктических регионах.

Современные ультразвуковые системы (АМК-03, Vaisala WMT700, Gill WindSonic) обеспечивают более высокую точность ($\pm 2\text{--}4^\circ$ по направлению), низкий порог чувствительности (0,01–0,1 м/с) и отсутствие подвижных частей, однако их эксплуатация в России сталкивается с рядом ограничений:

1. Высокая стоимость (от 300 до 800 тыс. руб. за комплект);
2. Зависимость от импортных комплектующих и сервисного обслуживания в условиях санкций;
3. Повышенное энергопотребление систем обогрева, затрудняющее применение на автономных станциях с ограниченным питанием.

Таким образом, существующие методы и технические средства измерения направления ветра не в полной мере отвечают современным требованиям по надёжности, экономической доступности и устойчивости к суровым климатическим условиям Российской Федерации. Это создаёт «окно возможностей» для разработки простого, недорогого и надёжного отечественного датчика на основе эффекта Холла, который сочетает бесконтактность, высокую точность (до $0,1^\circ$), низкое энергопотребление и отсутствие механического износа.

Именно исследование возможности применения бесконтактного магнитного энкодера на эффекте Холла (в частности, AS5600) для измерения направления ветра, а также создание и экспериментальная апробация соответствующего прототипа составляют предмет дальнейшего рассмотрения в последующих главах работы.

2. ВТОРАЯ ГЛАВА

2.1 Физическая природа эффекта Холла и эволюция его исследований

Эффект Холла представляет собой одно из ключевых электромагнитных явлений, широко используемых в современной измерительной технике, в том числе в гидрометеорологии для создания бесконтактных датчиков направления ветра. Сущность эффекта заключается в возникновении поперечного электрического напряжения в проводящей среде при одновременном воздействии электрического тока и перпендикулярного магнитного поля. Данное явление было открыто в 1879 году американским физиком Эдвином Гербертом Холлом и с тех пор стало основой для разработки прецизионных магнитных датчиков, обеспечивающих высокую точность и надёжность в условиях внешней среды. [16, 19, 31]

История открытия и эволюция исследований

Эффект Холла был обнаружен Э.Х. Холлом в ходе экспериментов по изучению влияния магнитного поля на проводимость металлов. В 1879 году в лаборатории Гарвардского университета Холл использовал тонкие золотые пластинки, через которые пропусклся ток, а магнитное поле создавалось электромагнитом. Результаты показали, что между боковыми гранями пластины возникает напряжение, перпендикулярное направлениям тока и поля. Это явление не было связано с изменением сопротивления, а представляло собой самостоятельный поперечный эффект.

Открытие Холла было опубликовано в журнале *American Journal of Mathematics* в декабре 1879 года под названием «On a New Action of the Magnet on Electric Currents». [18]

В XX веке исследования эффекта Холла получили развитие в полупроводниках, где концентрация носителей заряда на несколько порядков ниже, чем в металлах, что значительно усиливает эффект. В 1980 году Клаус фон Клитцинг открыл квантовый эффект Холла, что стало основой для новых стандартов измерения электрического сопротивления и магнитной индукции [19].

2.2 Теоретическая основа работы датчиков Холла и влияние внешних факторов.

Теоретическая основа.

Фундаментальный механизм работы датчиков Холла базируется на одноименном физическом явлении, открытом Эдвином Холлом. Эффект проявляется в возникновении разности потенциалов (напряжения Холла) в проводнике или полупроводнике с протекающим через него током, помещенном в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока. С физической точки зрения приложенное магнитное поле оказывает силовое воздействие на подвижные носители заряда (электроны или дырки), отклоняя их траекторию под действием силы Лоренца. Это смещение зарядов к краям полупроводниковой пластины создает поперечную разность потенциалов, которая прямо пропорциональна напряженности магнитного поля и силе протекающего тока. [22]

В метеорологическом оборудовании датчики Холла обычно состоят из тонкой пластины полупроводникового материала, установленной на подложке с электрическими контактами. Выбор материала критически важен для обеспечения стабильности измерений в различных климатических зонах. [16, 32]

Влияние внешних факторов.

Влияние внешних факторов на датчики Холла является критическим аспектом при их проектировании и эксплуатации, особенно в прецизионных областях, таких как метеорология. Основными факторами, определяющими точность и стабильность работы этих устройств, являются температура, геометрические несовершенства, внешние магнитные помехи и условия окружающей среды.

Температурные воздействия.

Температура считается основным фактором, вызывающим дрейф характеристик датчика Холла. Это влияние проявляется на нескольких уровнях:

1. Изменение свойств носителей: температурные колебания напрямую влияют на подвижность носителей заряда и электрическое сопротивление компонентов датчика. В полупроводниках концентрация носителей и коэффициент Холла зависят от температуры. [20]
2. Температурный дрейф: даже в современных датчиках целью проектирования является удержание температурного дрейфа ниже 0,3 мкТл.
3. Зависимость от материала: Чувствительность к температуре сильно зависит от используемого материала. Например, датчики на основе антимонида индия (InSb) сохраняют линейность характеристик в экстремальном диапазоне от температур жидкого гелия до $+350^{\circ}\text{C}$, что делает их незаменимыми для высотного зондирования и арктических условий. Кремниевые датчики обычно ограничены диапазоном от -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$. [27, 28]
4. Влияние на сопутствующие компоненты: Температура влияет не только на сам датчик, но и на магниты, используемые в системе. Например, керамические магниты имеют отрицательный температурный коэффициент, что необходимо учитывать при расчете силы магнитного поля в разную погоду. [22]

Геометрические и производственные факторы (Напряжение смещения)

В реальности датчики Холла обладают напряжением смещения (offset) — паразитным сигналом на выходе при отсутствии магнитного поля [17].

Причинами его возникновения являются:

1. Ошибки изготовления: Несовершенства процесса литографии, неточное выравнивание контактов и неоднородность толщины или удельного сопротивления материала.
2. Механические напряжения: Внешнее давление и механические напряжения в сочетании с эффектом пьезорезистивности вызывают изменение сопротивления кристалла, что приводит к асимметрии мостовой схемы датчика и появлению смещения [29, 17].
3. Геометрия элемента: Форма датчика (например, «греческий крест») и его размеры существенно влияют на величину остаточного смещения [29].

Магнитные помехи

Внешние магнитные поля: Близлежащие источники магнитных полей могут искажать показания, вызывая дрейф сигнала. Для компенсации этого в современных метеорологических приборах применяются 3D-датчики Холла, которые измеряют компоненты поля по трем осям (X, Y, Z) и используют встроенные алгоритмы для отсеивания паразитных полей [27].

Факторы окружающей среды в метеорологии

Датчики Холла обладают уникальным преимуществом — «иммунитетом» к загрязнениям.

1. Загрязнение и осадки: в отличие от оптических датчиков, работа датчиков Холла основана на магнитном взаимодействии, которое

беспрепятственно проникает через пластик, алюминий или нержавеющую сталь. Они нечувствительны к пыли, песку, конденсату или насекомым.

2. Влага и коррозия: магнитный принцип позволяет полностью герметизировать электронику датчика, защищая её от коррозии, вызванной высокой влажностью (до 98%) в осадкомерах или соляным туманом на морских станциях.
3. Вибрации: в отличие от герконов, датчики Холла являются твердотельными устройствами и не страдают от «дребезга контактов» или механического износа при сильных вибрациях.

Методы минимизации влияния внешних факторов

Для борьбы с дрейфом и смещением применяются следующие технологические решения:

1. Current Spinning (динамическая отмена смещения): метод циклического переключения направления тока через датчик, позволяющий математически исключить постоянную составляющую ошибки смещения. [20, 29]
2. Встроенная термокомпенсация: использование дополнительных термодатчиков и усилителей, которые автоматически корректируют выходной сигнал в зависимости от температуры. [20]
3. Использование дифференциальных схем: применение двух близко расположенных датчиков позволяет вычитать общие для них температурные помехи. [20]
4. Программная коррекция: реализация алгоритмов в микроконтроллерах (например, ESP32, Arduino) для учета известных температурных зависимостей в реальном времени.

2.3 Принцип работы магнитных энкодеров и их сравнение с другими датчиками угла

Магнитные энкодеры на эффекте Холла представляют собой современный класс датчиков углового положения, которые обеспечивают абсолютное или инкрементальное измерение угла поворота без механического контакта. В гидрометеорологии такие устройства находят применение в электронных флюгерах, где требуется высокая точность и устойчивость к внешним воздействиям (обледенение, осадки, турбулентность). Принцип работы основан на регистрации изменения магнитного поля от вращающегося постоянного магнита с помощью датчиков Холла.

Архитектура и алгоритмы обработки сигнала.

Архитектура и алгоритмы обработки сигналов в современных абсолютных магнитных энкодерах, таких как AS5600, представляют собой сложную интеграцию полупроводниковых технологий и методов цифровой обработки данных, что позволяет достигать высокой точности в бесконтактном измерении углового положения. [25]

Основные элементы архитектуры

Согласно технической документации, типичный абсолютный магнитный энкодер состоит из следующих ключевых компонентов:

1. Постоянный магнит: используется диаметрально намагниченный магнит, закрепленный соосно валу вращения. Поле такого магнита имеет полюса N и S, расположенные в плоскости вращения, что создает синусоидальное изменение вертикальной составляющей магнитного поля (B_z) по окружности чувствительных элементов. [25]
2. Матрица датчиков Холла: в центре корпуса микросхемы расположены планарные датчики Холла, размещенные по кругу (например, радиусом 1 мм в AS5600). Эти элементы преобразуют компоненту магнитного

поля, перпендикулярную поверхности чипа, в соответствующее напряжение. [25]

3. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП): для оцифровки сигналов, поступающих с датчиков после их усиления и фильтрации, используется 12-битный АЦП. Это обеспечивает высокое разрешение выходного сигнала, позволяя различать до 4096 уровней на один полный оборот в 360° . [25]

Алгоритмы обработки сигнала

Сердцем цифровой части энкодера является специализированный вычислительный блок, реализующий прецизионные математические методы:

1. Алгоритм CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer): Этот аппаратный блок обрабатывает оцифрованные сигналы для вычисления угла и амплитуды вектора магнитного поля. Основная задача алгоритма — расчет арктангенса двух квадратурных сигналов:

$$\theta = \arctg 2(V_y, V_x)$$

Где V_y, V_x напряжения, соответствующие проекциям магнитного поля. Использование функции позволяет корректно определять угол во всех четырех квадрантах ($0-360^\circ$) и исключает ошибки, связанные с нелинейностью поля. [25]

2. Автоматическая регулировка усиления (AGC): Система работает в замкнутом контуре (closed loop), динамически подстраивая уровень усиления сигналов. AGC критически важна для компенсации внешних факторов:

1. Изменения воздушного зазора (airgap) между магнитом и микросхемой (типичный диапазон 0.5–3 мм). [25]
2. Температурных колебаний, влияющих на свойства полупроводника и магнита. [25]
3. Естественной деградации (размагничивания) постоянного магнита со временем. В AS5600 значение AGC может варьироваться от 0 до 255 (при

питании 5В), поддерживая амплитуду сигнала в оптимальном рабочем диапазоне. [25]

2.4 Сравнение с другими типами датчиков угла в метеорологии

В метеорологическом приборостроении выбор датчика угла поворота флюгарки напрямую определяет точность, надежность и долговечность всей системы мониторинга атмосферных процессов. Сравнение различных типов датчиков на основе предоставленных источников позволяет выделить следующие особенности:

Потенциометрические датчики

Традиционно использовались в приборах типа М-63М-1, но сейчас считаются устаревающими из-за серьезных конструктивных ограничений.

1. Механический износ: постоянное трение скользящего контакта (щетке) о резистивный слой приводит к физическому истиранию материалов.
2. Мертвая зона: одной из самых острых проблем является разрыв проводящей дорожки в районе севера (360°), создающий зону нечувствительности, где данные либо недостоверны, либо отсутствуют.
3. Ресурс и надежность: эксплуатационный срок таких датчиков ограничен 2–5 годами, а отсутствие эффективного обогрева делает их крайне уязвимыми к обледенению, что в арктических условиях может привести к полной блокировке прибора. [5]

Оптические датчики (абсолютные энкодеры)

Используются в системах, требующих предельной точности, например, в авиации или военной метеорологии.

1. Высокая точность: оптические методы позволяют достигать разрешения в 12–16 бит, что обеспечивает определение направления с точностью до долей градуса.
2. Чувствительность к среде: главным недостатком является уязвимость для внешних загрязнений: попадание пыли, песка, конденсата или насекомых на линзы и фотодетекторы может вызвать критические ошибки в измерениях.
3. Преимущества: обладают отличной помехозащищенностью и выдают точное значение угла сразу после включения питания без предварительной калибровки.

Ультразвуковые датчики

Представляют собой полностью твердотельные системы без движущихся частей, работающие на принципе измерения разности времени прохождения звукового импульса.

1. Нулевой порог: в отличие от механических систем, им не нужен «ветер страгивания», они начинают фиксировать движение воздуха практически с 0 м/с.
2. Высокая стоимость и энергопотребление: стоимость таких приборов значительно выше механических аналогов. Кроме того, для предотвращения обледенения им требуется мощный обогрев, что ограничивает их применение на автономных станциях с питанием от солнечных батарей.

Магнитные датчики на эффекте Холла

На сегодняшний день считаются оптимальным технологическим решением для автоматизированных метеостанций, сочетая преимущества бесконтактного считывания и низкой стоимости.

1. Отсутствие «мертвых зон»: использование прецизионных магнитных элементов позволяет достичь непрерывного измерения на все 360°.

2. Долговечность и надежность: поскольку это твердотельные устройства без подвижных электрических контактов, их ресурс практически не ограничен и может превышать десятки лет. Они «иммунны» к пыли, влаге и коррозии, так как магнитное поле беспрепятственно проникает через герметичные корпуса. [5]
3. Точность: применение современных 3D-датчиков Холла позволяет снизить неопределенность измерений до $\pm 1.6^\circ$, в то время как старые потенциометрические модели имели погрешность более $\pm 4.3^\circ - 10^\circ$.
4. Экономическая эффективность: при низкой стоимости они обеспечивают надежность, сопоставимую с ультразвуковыми системами, при гораздо меньшем энергопотреблении (на уровне микроампер для некоторых моделей).

Таким образом, датчики Холла обеспечивают наиболее надежный «мост» между физическими атмосферными явлениями и цифровыми моделями, гарантируя точность данных даже в самых суровых климатических условиях.

2.5 Обоснование выбора датчика AS5600 как объекта исследования

Обзор датчика AS5600 как объекта исследования

Датчик AS5600 производства компании ams - OSRAM представляет собой современный бесконтактный магнитный энкодер абсолютного положения, основанный на эффекте Холла. Он разработан специально для задач точного измерения угла поворота в диапазоне $0 - 360^\circ$ и находит применение в различных областях, включая гидрометеорологию, где требуется надёжное определение направления ветра без механического износа и влияния внешних факторов.

Технические характеристики и архитектура

AS5600 выполнен в компактном корпусе SOIC-8 и содержит следующие основные элементы [13]:

1. Матрица датчиков Холла – четыре элемента, расположенных квадратно под углом 90° друг к другу. Это позволяет получать квадратурные сигналы по осям X и Y.
2. Аналого-цифровой преобразователь – 12-битный (4096 уровней), обеспечивающий угловое разрешение $0,0879^\circ$.
3. Цифровой сигнальный процессор – реализует алгоритм CORDIC для вычисления арктангенса и определения угла
4. Автоматическая регулировка усиления (AGC) – компенсирует изменение расстояния между магнитом и датчиком, поддерживая амплитуду сигнала в оптимальном диапазоне (10–230 единиц).
5. Интерфейс – I²C с фиксированным адресом 0x36.
6. Диапазон питания – 3,0–5,5 В, потребляемый ток 3–6 мА.
7. Диапазон рабочих температур – от -40°C до $+125^\circ\text{C}$.
8. Встроенная защита – от перегрузки по напряжению, ESD и EMI.

Архитектура датчика позволяет считывать сырое значение угла (регистр RAW_ANGLE) в диапазоне 0 – 4095, а также дополнительные параметры: AGC, магнитный статус и диагностические регистры. [25]

Преимущества и ограничения для метеорологических применений

Преимущества:

1. Бесконтактность – отсутствие подвижных частей исключает износ и влияние обледенения, что особенно важно для полевых метеостанций в условиях сурового климата.
2. Высокая точность – разрешение $0,0879^\circ$.

3. Низкое энергопотребление – 3–6 мА позволяет использовать датчик в автономных системах с питанием от солнечных батарей или аккумуляторов.
4. Простота интеграции – двухпроводной интерфейс I²C совместим с большинством микроконтроллеров (Arduino, STM32, ESP32).
5. Устойчивость к внешним факторам – встроенная компенсация однородных магнитных полей и защита от ЕМІ минимизирует влияние линий электропередач и промышленных источников.

Ограничения:

1. Чувствительность к расстоянию магнит–датчик – оптимальное расстояние 1–3 мм; отклонение более 5 мм приводит к снижению амплитуды сигнала и росту погрешности.
2. Возможность магнитных помех – сильные неоднородные поля (например, от мощных источников) могут искажать показания; требуется экранировка или удалённое размещение.
3. Отсутствие встроенной защиты от влаги – требует герметичного корпуса (IP65+) для уличной эксплуатации.
4. Необходимость калибровки магнита – правильное позиционирование магнита критично для линейности и стабильности AGC.

Сравнение с датчиками в существующих метеостанциях

В современных метеорологических станциях Росгидромета и международных системах используются различные типы датчиков направления ветра:

1. Потенциометрические (например, в АМК-Р) – погрешность $\pm 2\text{--}5^\circ$, ресурс 3–5 лет, подвержены обледенению.
2. Ультразвуковые (Vaisala WMT700, Gill WindSonic) – погрешность $\pm 2^\circ$, высокая стоимость (50–100 тыс. руб.), устойчивость к осадкам.
3. Оптические – погрешность $\pm 1^\circ$, чувствительны к пыли и влаге.

4. Магнитные на эффекте Холла.

AS5600 превосходит традиционные датчики по точности и долговечности, что делает его перспективным для импортозамещения в АМК и локальных метеостанциях.

Перспективы интеграции в метеорологические сети

Датчик AS5600 может быть интегрирован в:

1. Автоматизированные метеостанции (АМК) – замена потенциометрических флюгеров;
2. Авиационные метеоплощадки – точное измерение бокового ветра на ВПП;
3. Ветроэнергетику – определение розы ветров с высокой детализацией;
4. Автономные метеопосты – с питанием от солнечных батарей и передачей данных по LoRa или NB-IoT.

2.6 Выводы по главе 2

Проведённый анализ современных методов и технических средств измерения направления ветра в гидрометеорологии позволяет сформулировать следующие выводы.

Традиционные механические флюгеры (Вильде, Фусса, М-63М-1) и электромеханические (потенциометрические) приборы, несмотря на многолетнее использование в сети наблюдений Росгидромета, обладают существенными эксплуатационными и метрологическими недостатками. К ним относятся: высокий порог чувствительности (0,8–2,0 м/с), наличие «мёртвой зоны» в районе 360°, значительная инерционность, низкая

устойчивость к обледенению, коррозии и механическому износу. Эти факторы приводят к частым простоям, особенно в арктических и субарктических регионах, а также к снижению качества данных при слабом и порывистом ветре.

Современные ультразвуковые системы (АМК-03, Vaisala WMT700, Gill WindSonic) обеспечивают существенно более высокие метрологические характеристики: погрешность направления $\pm 2-4^\circ$, порог чувствительности 0,01–0,1 м/с, отсутствие подвижных частей и мгновенную реакцию на изменения. Однако их массовое внедрение в России ограничено высокой стоимостью (от 300 до 800 тыс. руб. за комплект), зависимостью от импортных комплектующих и сервисного обслуживания, а также повышенным энергопотреблением систем обогрева, что критично для автономных станций с ограниченным питанием.

Теоретический анализ физической природы эффекта Холла и архитектуры магнитных энкодеров абсолютного положения (в частности, датчика AS5600) показал, что данный принцип позволяет устранить большинство выявленных недостатков традиционных и импортных систем. Бесконтактность исключает механический износ и влияние обледенения на подвижные части. Высокое разрешение ($0,0879^\circ$) и погрешность менее $0,1^\circ$ значительно превосходят требования нормативных документов (ГОСТ Р 8.736-2011, WMO-No.8). Низкое энергопотребление (3–6 мА) и доступная стоимость модуля (150–350 руб.) создают предпосылки для разработки простого, надёжного и экономически эффективного отечественного датчика направления ветра.

Таким образом, применение бесконтактных магнитных энкодеров на эффекте Холла открывает реальную возможность импортозамещения и модернизации метеорологической сети наблюдений. Полученные теоретические положения и сравнительный анализ послужили основой для экспериментального исследования и практической реализации прототипа

электронного флюгера на базе датчика AS5600, что будет рассмотрено в последующих главах работы.

3. ТРЕТЬЯ ГЛАВА

3.1 Выбор компонентов и обоснование

Разработка электронного флюгера проводилась с учётом требований к высокой точности измерения направления ветра, надёжности в уличных условиях, минимальному энергопотреблению и низкой стоимости реализации. Выбор компонентов осуществлялся на основе анализа современных датчиков магнитного поля и микроконтроллеров, доступных на рынке в 2024–2025 годах, с приоритетом на бесконтактность и простоту интеграции и наличие открытой документации.

В качестве основного чувствительного элемента выбран бесконтактный магнитный энкодер AS5600 производства компании ams-OSRAM. Датчик обеспечивает разрешение 12 бит (4096 шагов на 360°), что соответствует угловому разрешению $0,0879^\circ$. Интерфейс I²C с адресом 0x36 позволяет использовать всего две линии передачи данных. Диапазон рабочих температур составляет от -40°C до $+125^\circ\text{C}$, а потребляемый ток не превышает 6 мА при напряжении питания 3,0–5,5 В. Встроенный АЦП и алгоритм обработки сигнала от четырёх датчиков Холла гарантируют стабильное определение угла положения.

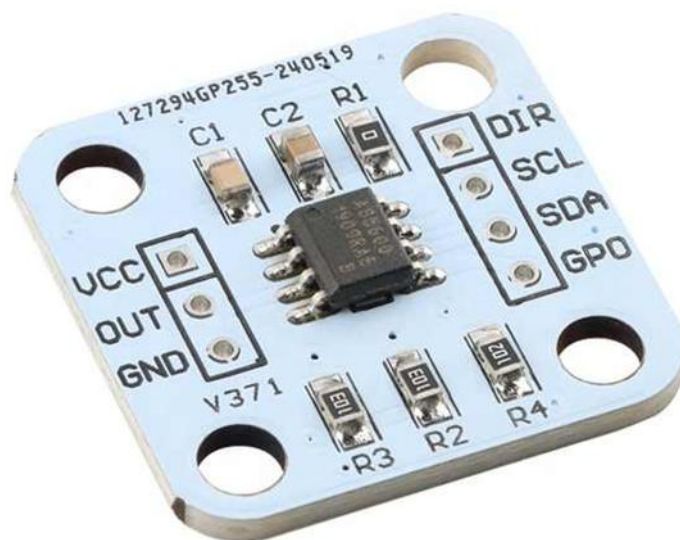


Рис. 1. Изображение датчика AS5600

Выбор AS5600 обусловлен несколькими факторами. Бесконтактный принцип действия полностью исключает износ, трение и люфт, характерные для потенциометрических датчиков. Погрешность менее $0,1^\circ$ превосходит требования большинства метеорологических стандартов, включая рекомендации ВМО ($\pm 3^\circ$ для механических флюгеров). Простота интеграции через I²C не требует дополнительных преобразователей, а стоимость модуля в 2025 году составляет 500–700 рублей, что делает проект экономически целесообразным для полевых и образовательных применений. Кроме того, встроенная компенсация однородных магнитных полей и защита от электромагнитных помех обеспечивают устойчивость к внешним воздействиям.

Альтернативные варианты (AS5048A, TLE5012B, MA730) были рассмотрены, однако AS5600 оказался оптимальным по соотношению цены, точности и доступности, а также наличию большого количества готовых библиотек для Arduino.

В качестве управляющего элемента системы выбран микроконтроллер Arduino Nano, выполненный на базе чипа ATmega328P. Данная платформа широко применяется в образовательных и прототипных проектах благодаря оптимальному сочетанию компактности, функциональности и доступности.

Основные технические характеристики Arduino Nano:

1. Тактовая частота процессора — 16 МГц.
2. Объём флэш-памяти — 32 Кбайт (из них 2 Кбайт используются загрузчиком).
3. Оперативная память (SRAM) — 2 Кбайт.
4. Постоянная память (EEPROM) — 1 Кбайт.
5. Количество цифровых выводов — 14 (из них 6 с поддержкой ШИМ).
6. Аналоговых входов — 8 (разрешение АЦП 10 бит).
7. Интерфейсы — I²C (аппаратный), SPI, UART, USB (через чип CH340/FT232 для связи с компьютером).
8. Напряжение питания — 5 В (через встроенный стабилизатор) или 7–12 В. на вход Vin.

Выбор Arduino Nano обусловлен несколькими факторами, непосредственно связанными с задачами проекта. Компактные размеры позволяют разместить устройство в небольшом герметичном корпусе, что важно для полевых метеорологических измерений. Наличие аппаратного модуля I²C обеспечивает стабильную и одновременную работу с датчиком AS5600 без дополнительных преобразователей уровня сигналов. Объём памяти и производительность процессора достаточны для выполнения операций чтения raw-значений, их пересчёта в градусы, определения румба и вывода отладочной информации в монитор последовательного порта.

Широкая распространённость платформы и наличие большого количества готовых библиотек (в частности, AS5600.h от Rob Tillaart) значительно сокращают время разработки и отладки. Низкая стоимость (300–600 рублей в 2025 году) и возможность питания от USB-порта компьютера делают Arduino Nano экономически и технически оправданным решением на этапе создания прототипа.

Альтернативные варианты (ESP32, STM32F103) рассматривались для последующих версий проекта, где потребуется беспроводная передача данных

(Wi-Fi, LoRa) или более высокая производительность. Однако на текущем этапе, ориентированном на локальную отладку и минимализм конструкции, Arduino Nano обеспечивает необходимую функциональность при максимальной простоте реализации и надёжности.

Таким образом, применение Arduino Nano позволило сосредоточить внимание на ключевых аспектах проекта — точности измерения и устойчивости к внешним условиям, — сохранив при этом низкую себестоимость и удобство отладки.

Для создания магнитного поля используется неодимовый диск диаметром 6 мм и толщиной 2 мм с диаметральной намагниченностью (класс N35–N42). Магнит жёстко фиксируется на оси вращения флюгера эпоксидным клеем. Выбор неодимового магнита обусловлен высокой остаточной индукцией, что обеспечивает стабильный сигнал при оптимальном расстоянии 1–3 мм от поверхности датчика AS5600.

Ось вращения изготовлена из дерева (подойдет любой немагнитный материал – пластик или алюминий), чтобы исключить искажение магнитного поля. Для обеспечения строгой соосности и отсутствия люфта применены два шариковых подшипника (в данном случае используются стальные шариковые подшипники, закрытые с двух сторон, что может негативно сказаться на пороговой скорости). Это решение позволяет поддерживать постоянное расстояние между магнитом и датчиком при любом угле поворота оси флюгера.

Электроника и соединения размещены в пластиковом корпусе. Корпус имеет отверстие для вывода оси и отверстие для проводного соединения. Провода, идущие от контроллера к магнитному энкодеру, короткие (не более 10 см), что минимизирует паразитные ёмкости и индуктивности на шине I²C.

3.2 Аппаратная часть. Схема подключения, схема расположения элементов и сборка.

Сборка прототипов была разделена на несколько частей:

1. Проверка работоспособности компонентов;
2. Подготовка корпуса;
3. Сборка прибора;
4. Предварительная проверка точности.

Всего было собрано два прототипа. Первый отличался ненадежностью, усложнениями в электронике. Ниже будут представлены этапы сборки, принципиальные электрические схемы и представление в разрезе для понимания внутреннего устройства.

Первый прототип был создан в августе 2025 года и включал в себя:

1. Магнитный энкодер;
2. Управляющую плату;
3. OLED монитор;
4. Один стальной шариковый подшипник;
5. Стальную ось;
6. Труба из мягкого пластика.



Рис. 2. Схема расположения элементов в корпусе.

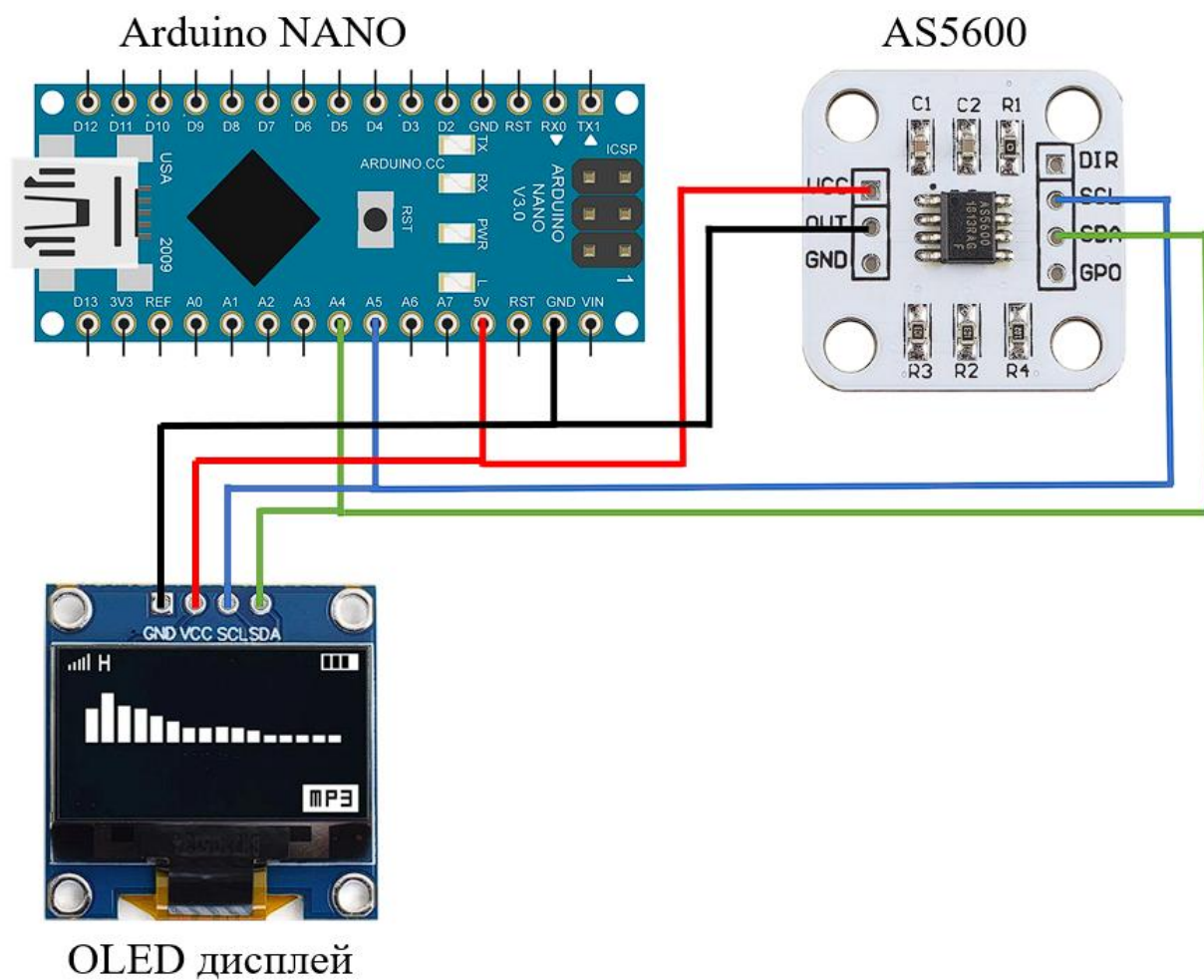


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема.

После того, как было установлено из чего будет собран прототип и была составлена схема подключения, подключил электронику на тестовом стенде.

Ниже представлены фотографии прототипа и его конструктивные недостатки, которые было невозможно исправить в данном исполнении, из-за чего был собран второй прототип, в котором были учтены минусы первого.

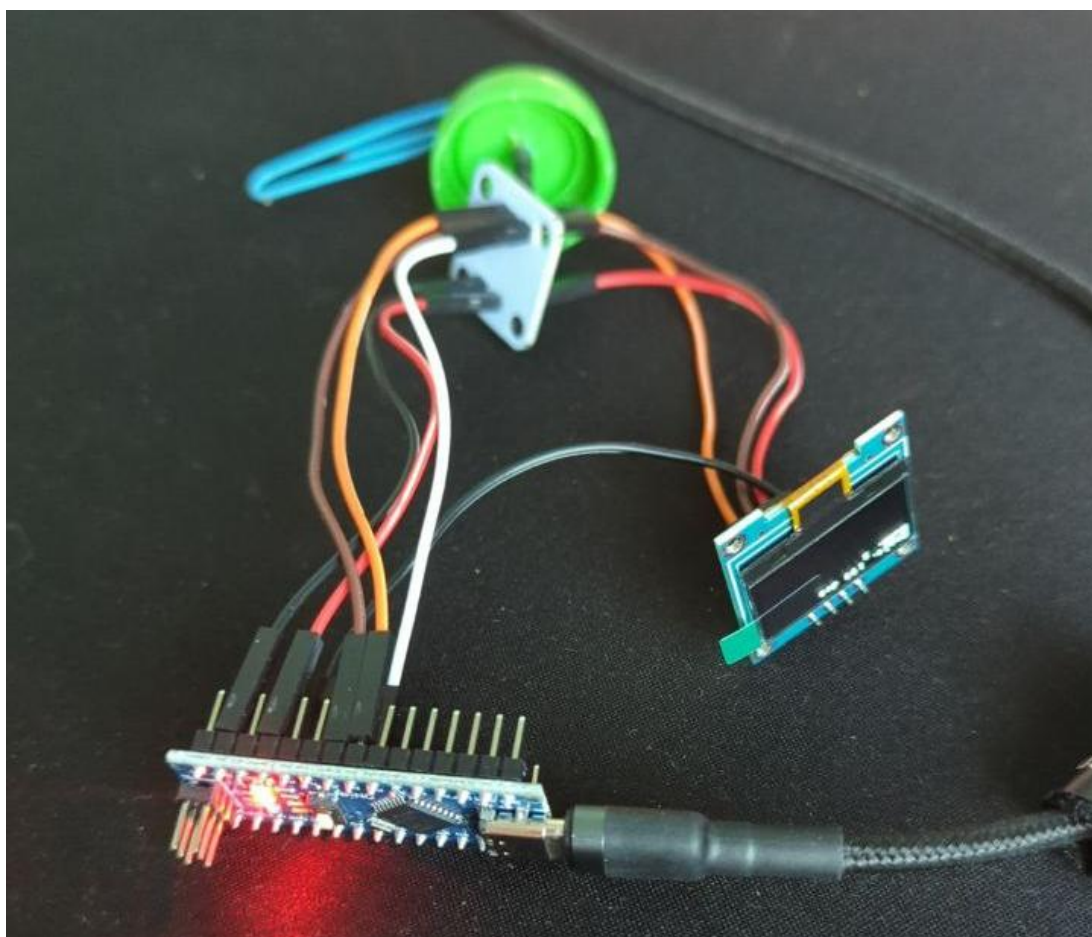


Рис. 4. Пробное подключение

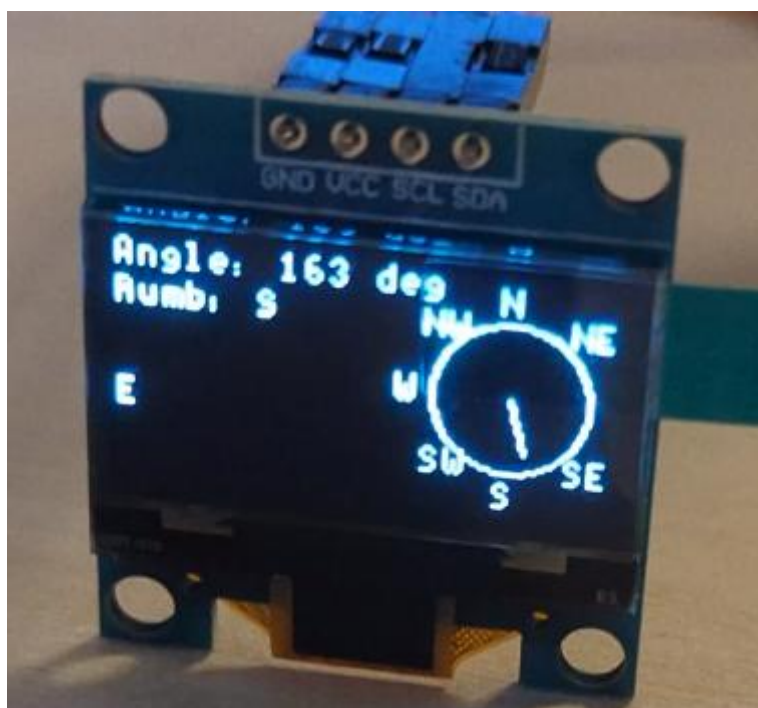


Рис. 5. Вывод информации на дисплей: угол, румб, компас.



Рис. 6. Собранный первый прототип. Сверху видна ось с вертикальной прорезью для установки флюгарки, ниже на корпусе расположен дисплей, на который выводится информация.

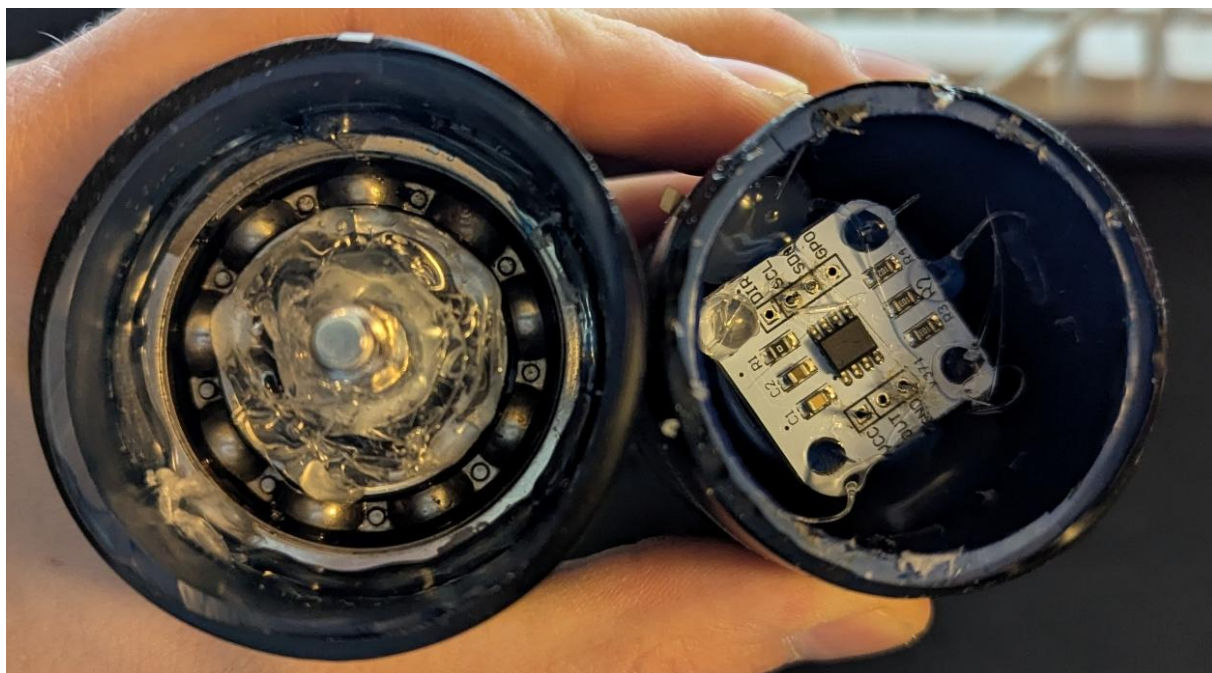


Рис. 7. Слева крышка корпуса, справа корпус. В крышке виден стальной подшипник, на котором держится ось, магнит и болт, справа в корпусе расположена плата магнитного энкодера AS5600.



Рис. 8. Крышка корпуса. Виден стальной болт, закрепленный на ось. На болте находится магнит.

Данный прототип неудачен из-за следующего:

1. Магнит прикреплен к стальному болту, из-за чего могут быть искажения магнитного поля вблизи энкодера, что может повлиять на точность измерений. Также стальной болт увеличивает массу оси, что в свою очередь увеличивает инерцию;
2. Ось расположена на одном массивном подшипнике, что не дает жесткой фиксации и ось движется относительно энкодера, что сильно влияет на точность измерений. При вращении на 90 градусов датчик отображал неверное изменение вращения оси. Также не было линейности;
3. Крышка корпуса была закреплена не жестко, что дает легкий доступ к обзору датчика, магнита, подшипника. Также крышка вращается, из-за чего каждый раз необходимо проверять заранее выставленные метки, чтобы правильно ориентировать на север;
4. Ось терлась о крышку корпуса, что создавало дополнительное трение;
5. Подшипник обладал большим трением, так как был снят с одной из частей лодочного мотора, то есть подшипник был в употреблении и изнашивался. Обслуживание в виде смазки не помогло уменьшить трение до допустимого уровня;
6. Плохой контакт. Прототип мог выдавать ошибку из-за плохого контакта на питании энкодера (GND – минусовой контакт, идущий на питание датчика, имел плохое соединение).

Совокупность перечисленных недостатков послужила причиной переработки конструкции и создания второго прототипа, который был избавлен от вышеперечисленных минусов.



Рис. 9. Второй прототип

Все вышеперечисленные ошибки были учтены при разработке второй версии прототипа, фотография которого представлена выше.

Ниже показана принципиальная электрическая схема и конструкция прибора.

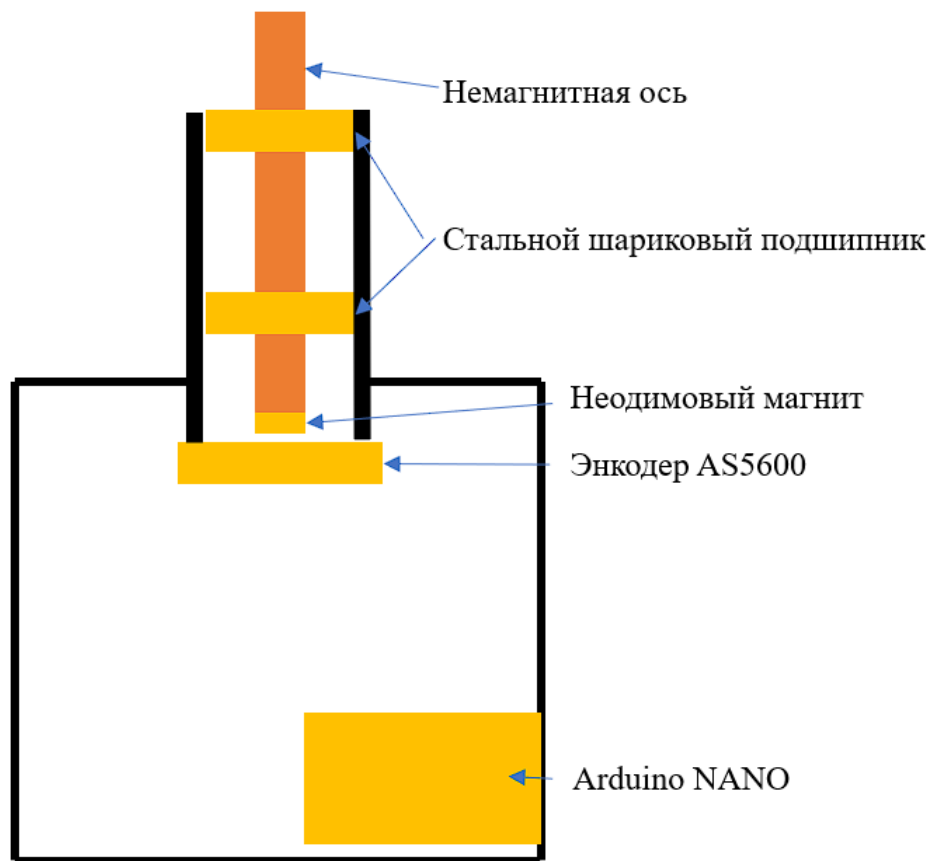


Рис. 10. Конструкция второго прототипа. Видно, что для стабильности оси используется два подшипника. Также ось из немагнитного материала.

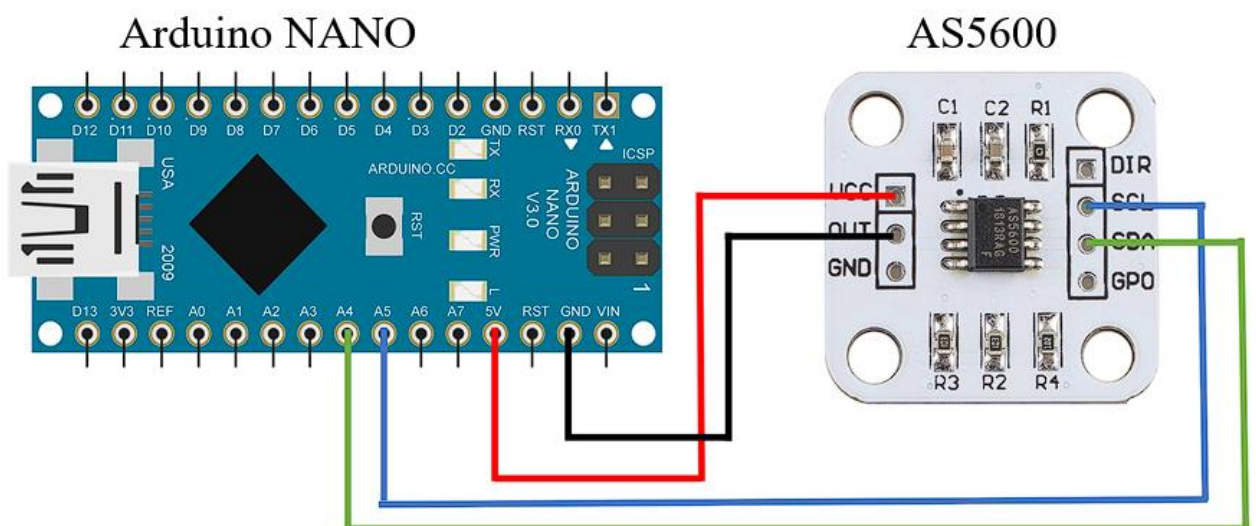


Рис. 11. Принципиальная электрическая схема. Убран дисплей.

Описание соединений:

Питание:

1. VCC датчика AS5600 → вывод 5V платы Arduino Nano;
2. GND датчика AS5600 → любой вывод GND платы Arduino Nano.
3. Шина I²C:
4. SDA → A4 (SDA) Arduino Nano;
5. SCL → A5 (SCL) Arduino Nano.

Датчик AS5600 закреплен неподвижно таким образом, чтобы центр кристалла находился точно под центром магнита. Допустимое смещение — не более ± 1 мм. Высота установки магнита над поверхностью датчика выдержана в диапазоне 1,5–2,5 мм (оптимальное значение по datasheet AS5600 для обеспечения максимальной амплитуды сигнала и линейности).

Использован неодимовый диск диаметром 8 мм и толщиной 2 мм с диаметральной намагниченностью. Магнит жёстко приклеен к нижней части оси флюгера клеем. Ось выполнена из немагнитного материала (дерева) для исключения искажений магнитного поля.

Электроника размещена в пластиковом корпусе. Провода имеют длину не более 10 см для минимизации паразитных емкости и индуктивности на шине I²C. Корпус имеет отверстие для ввода USB кабеля для питания и передачи данных.

После сборки корпуса и компоновки электроники, из пластика были вырезаны две части будущей флюгарки. На них было добавлено ребро жесткости и противовес. После был найден центр тяжести. Флюгарка закреплена на оси с помощью клея, проведена балансировка для предотвращения биений и неравномерной нагрузки на ось.

Для изготовления флюгарки использовался лист полипропилена толщиной 1 мм. Данный материал выбран благодаря своей лёгкости, устойчивости к влаге и атмосферным воздействиям. Однако ввиду небольшой толщины и гибкости полипропилена, для обеспечения необходимой жёсткости конструкции и предотвращения её деформации под действием ветра флюгарка была усилена продольными деревянными рейками, закреплёнными по всей

длине. Противовес выполнен с использованием подшипников, что позволило сбалансировать флюгарку.

Центр парусности (центр давления) флюгарки расположен на расстоянии примерно 8 см от оси вращения, что составляет около 60% общей длины флюгарки. Такое положение обеспечивает хороший вращающий момент при слабых ветрах и приемлемую инерционность конструкции. Расчёт проведён геометрическим методом по центру площади фигуры с учётом усиливающих деревянных реек.



Рис. 12. Две части флюгарки.



Рис. 13. Готовый прототип.

Программное обеспечение разработано в среде Arduino IDE и предназначено для чтения абсолютного углового положения с датчика AS5600, преобразования полученных данных в градусы и румбы, а также вывода результатов в монитор последовательного порта компьютера. Отказ от локального дисплея позволил существенно упростить код, уменьшить его объём и повысить стабильность работы системы.

Для работы с датчиком использована библиотека AS5600.h (автор Rob Tillaart). Библиотека обеспечивает удобный доступ к регистрам AS5600, включая чтение сырого значения угла, проверку соединения по шине I²C и управление направлением отсчёта. Стандартная библиотека Wire.h применяется для организации обмена данными по интерфейсу I²C.

Структура программы традиционна для платформы Arduino и состоит из двух основных блоков. В функции setup() выполняется инициализация последовательного порта на скорости 115200 бод, запуск шины I²C, инициализация датчика AS5600 с указанием пина DIR (пин 4) и установка направления измерения по часовой стрелке. После этого проводится проверка

связи с датчиком с помощью метода `isConnected()`. В случае отсутствия ответа в монитор выводится соответствующее сообщение.

В основном цикле `loop()` осуществляется чтение сырого значения угла с помощью функции `rawAngle()`. Полученное 12-битное значение (диапазон 0–4095) преобразуется в угол в градусах по формуле линейного масштабирования. Результат выводится в монитор последовательного порта вместе с сырым значением и показателем автоматической регулировки усиления (AGC), который позволяет косвенно оценивать качество магнитного сигнала. Если значение `rawAngle` выходит за допустимые пределы, программа выводит сообщение об ошибке чтения данных.

Задержка между циклами составляет 2000 мс, что обеспечивает обновление данных с частотой 0,5 Гц. Такой интервал выбран для снижения нагрузки на шину I²C и удобства наблюдения за показаниями при длительных испытаниях.

Программная реализация отличается максимальной простотой и надёжностью. Отсутствие графического интерфейса позволило сосредоточиться на стабильности измерений и удобстве отладки. Полученный алгоритм обеспечивает точное определение направления ветра с выводом всей необходимой диагностической информации в реальном времени.


```

1  #include "AS5600.h"
2
3  AS5600 as5600;
4
5  void setup() {
6      Serial.begin(115200);
7      Wire.begin();
8      as5600.begin(4);
9      as5600.setDirection(AS5600_CLOCK_WISE);
10     Serial.print("Connect: ");
11     int b = as5600.isConnected();
12     Serial.println(b ? "AS5600 connected" : "AS5600 not found");
13     delay(1000);
14 }
15
16 void loop() {
17     int raw = as5600.rawAngle();
18     if (raw >= 0 && raw < 4095) { // Проверка корректности данных
19         float angle = raw * 360.0 / 4096.0;
20         Serial.print("Angle: ");
21         Serial.print(angle);
22         Serial.print(" degrees | Raw: ");
23         Serial.print(raw);
24         Serial.print(" | AGC: ");
25         Serial.println(as5600.readAGC());
26     } else {
27         Serial.println("Error: Invalid raw angle");
28     }
29     delay(2000); // Увеличенная задержка
30 }

```

Рис. 14. Код программы.

3.3 Лабораторные испытания.

Флюгер был протестирован на:

1. Разрешающую способность (минимальный угол поворота оси, который сможет зафиксировать датчик);
2. Проверку зоны нуля;
3. Точность;
4. Минимальную пороговую скорость;

Далее все испытания описываются по порядку.

Первый и второй тесты. Проверка минимального поворота, градус которого, может зафиксировать собранный флюгер.

Проверка происходила следующим образом: прототип был подключен к компьютеру, чтобы в строке вывода Arduino читать информацию о текущем положении оси. Далее флюгарка поворачивалась на минимально возможное расстояние, которое можно достичь ручным способом.

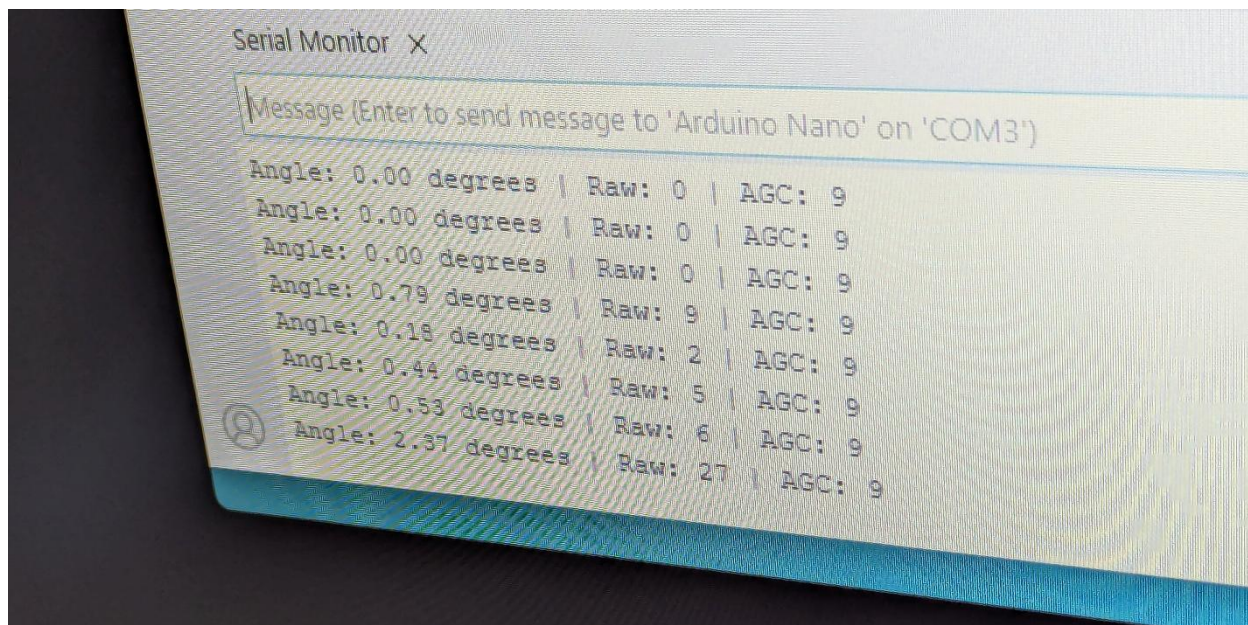


Рис. 15. Окно вывода информации.

Следует обратить внимание на строки 6 и 7. Смог достичь поворота на 0.09 градуса (изначально ось была повернута на 0.44 градуса, после небольшого усилия, флюгарку удалось повернуть до значения 0.53 градуса). Это минимальный градус, на который удалось повернуть флюгарку, однако разрешающая способность достигает одной сотой градуса (0.01 градуса), что является хорошим показателем, но во время испытания удалось достичь точности в девять сотых градуса, что можно округлить до одной десятой (0.1) градуса. Даже такой результат является хорошим показателем точности и возможностей энкодера AS5600.

Во время проверки разрешающей способности удалось выставить флюгер на нули. При плавном и при резком переходе через 0° из области 355–5° датчик стабильно отображал корректные значения без скачков, что подтверждает отсутствие "мёртвой зоны", характерной для потенциометрических систем.

Третий тест на точность и повторяемость значений был организован следующим образом: на миллиметровке была расчерчена окружность, отмечена градуировка (0, 90, 180, 270). Флюгер был выставлен по центру окружности. Поочередно флюгарка направлялась по вышеописанным меткам и, соответственно, снимались значения с строки вывода Serial Monitor. Далее будут описаны результаты.

1. Ноль градусов: флюгарка была направлена на отметку, соответствующую нулю. В Serial Monitor выводилось значения от 359 до 0 градусов. На ниже представленных фото будут видны все значения.
2. Девяносто градусов: флюгарка направлена на 90 градусов, в Serial Monitor были значения от 89 до 90 градусов.
3. Сто восемьдесят градусов: направление флюгарки и показания Serial Monitor отличались на один градус (в строке вывода было указано 179 градусов).
4. Двести семьдесят градусов: показания Serial Monitor и направление флюгарки совпало.

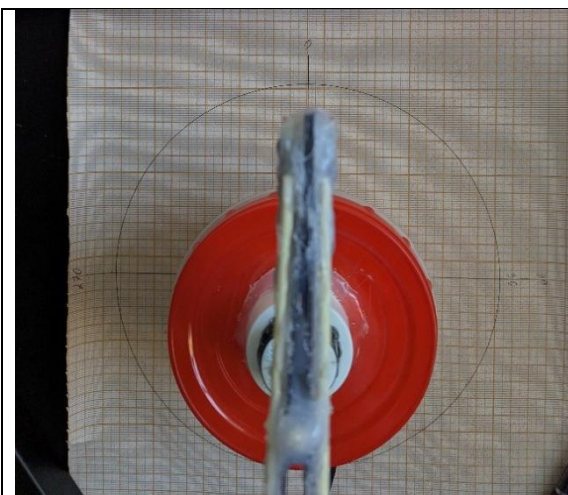


Рис. 16. Флюгер выставлен на 0 градусов

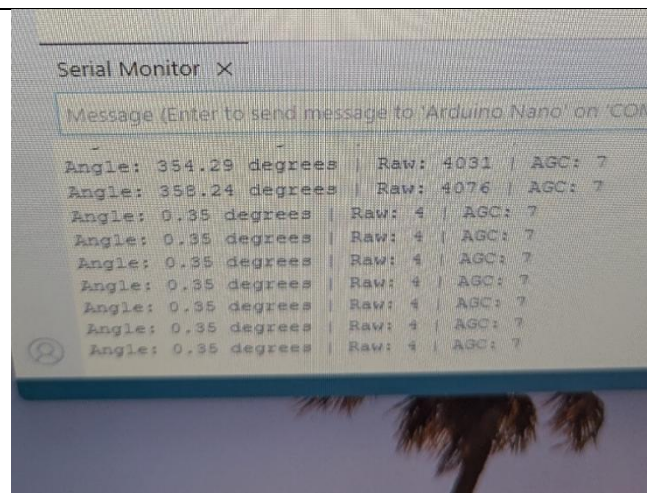


Рис. 17. Показания в Serial Monitor



Рис. 18. Флюгер выставлен на 90
градусов

```
Angle: 89.65 degrees |
Angle: 89.65 degrees |
Angle: 89.56 degrees |
Angle: 89.65 degrees |
Angle: 89.65 degrees |
Angle: 89.65 degrees |
Angle: 89.65 degrees |
Angle: 89.56 degrees |
Angle: 89.65 degrees |
```

Рис. 19. Значения в Serial Monitor

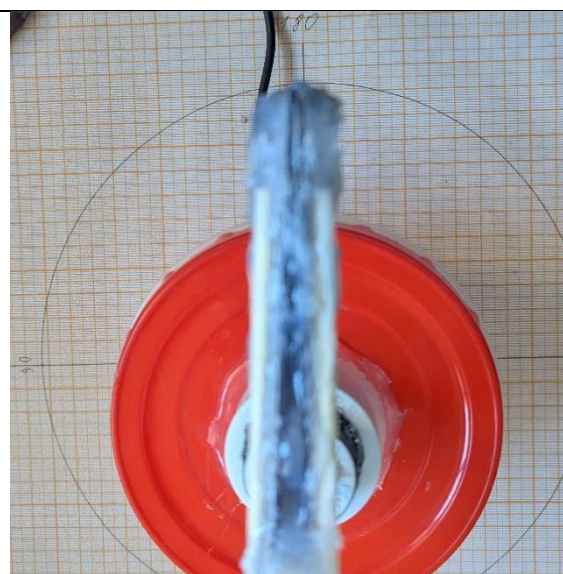
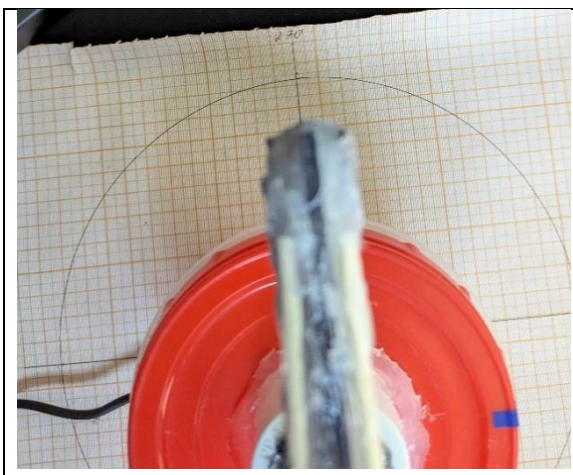
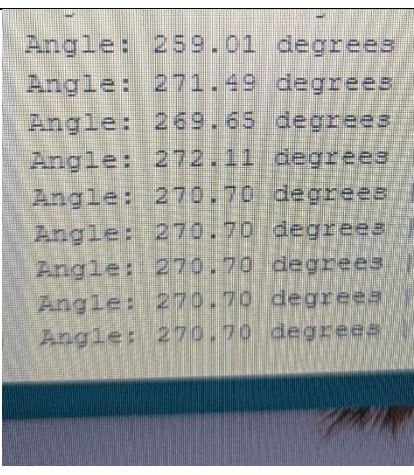


Рис. 20. Флюгер выставлен на 180
градусов

```
Angle: 179.21 degrees |
Angle: 179.21 degrees |
Angle: 179.21 degrees |
Angle: 179.21 degrees |
Angle: 179.21 degrees |
Angle: 179.21 degrees |
Angle: 179.12 degrees |
Angle: 179.12 degrees |
Angle: 179.12 degrees |
```

Рис. 21. Значения в Serial Monitor

	
Рис. 22. Флюгер выставлен на 270 градусов	Рис. 23. Значения в Serial Monitor

Измерения были повторены для проверки результата. Выявлено, что результаты демонстрируют высокую повторяемость: при возвращении оси в одно и тоже положение датчик стабильно выдаёт практически идентичные показания. Это свидетельствует о хорошей стабильности и воспроизводимости работы измерительной системы, а также подтверждает корректность выбранной конструкции (фиксации магнита и оси) и отсутствие значительных люфтов или магнитных искажений.

Четвертый тест на минимальную пороговую скорость был проведен в аудитории 316 первого корпуса, так как именно в этой аудитории присутствует необходимая для теста аэротруба.

Флюгер был поставлен на минимальном от аэротрубы расстоянии, флюгер повернут перпендикулярно относительно установки. Постепенно повышая напряжение, следил за флюгером. На отметке 50 вольт флюгер начал разворачиваться по направлению воздушного потока. Данное напряжение соответствует скорости ветра 1 м/с. Однако флюгер не смог развернуться параллельно воздушному потоку, повернувшись на 48 градусов. Повысив напряжение до 110 вольт, что соответствует скорости ветра примерно 4,5 м/с, флюгер повернулся на 69 градусов относительно начального положения.

Дальнейшее повышение напряжения до 130 вольт (примерно 5,5 м/с) не дало результата в плане поворота флюгера. После была проведена дополнительная проверка пороговой скорости, и её результаты совпали с первой проверкой минимальной рабочей скорости ветра.

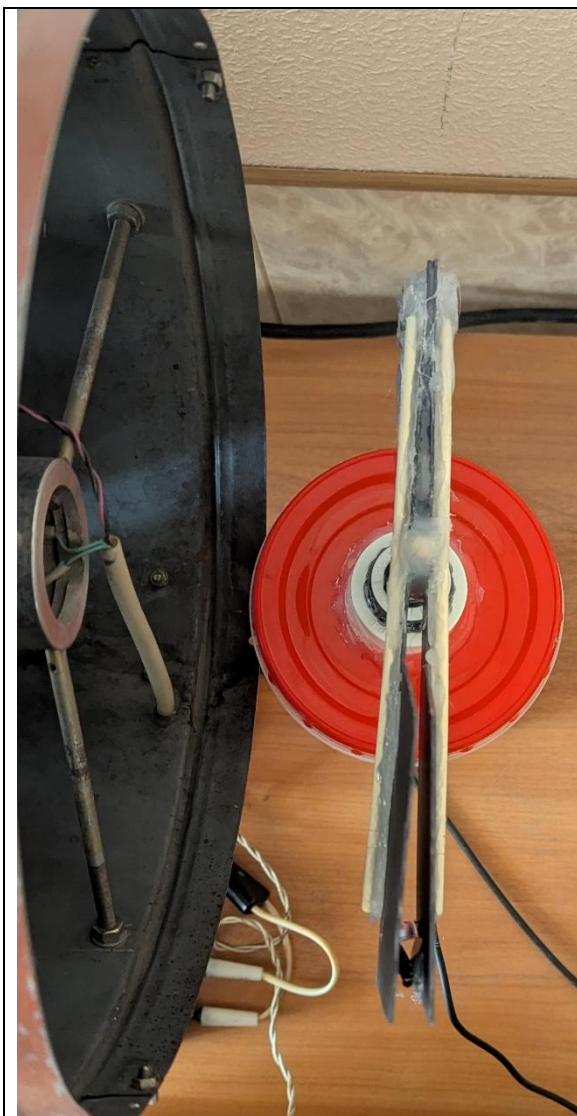


Рис. 24. Флюгер перпендикулярен аэротрубе

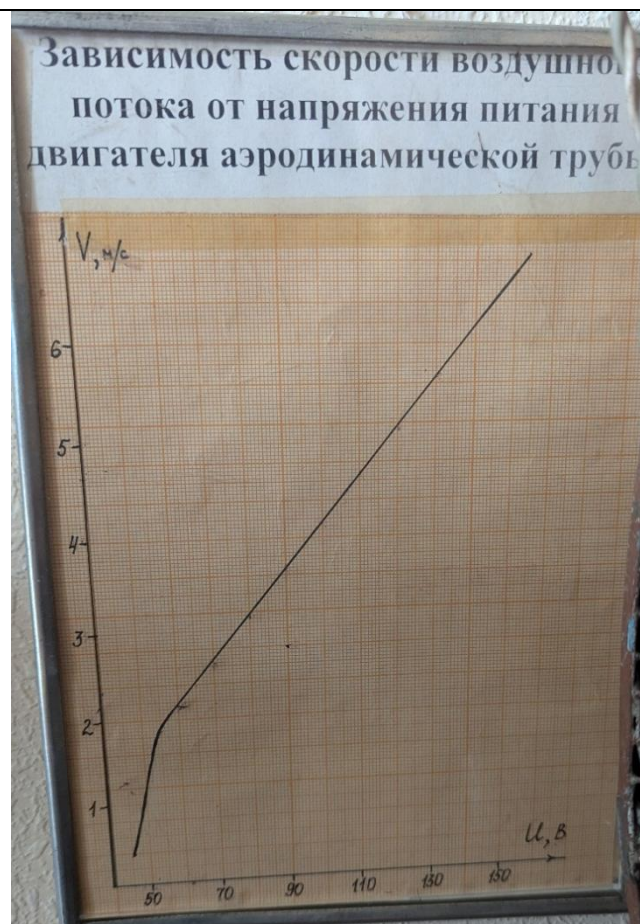


Рис. 25. Зависимость скорости воздушного потока от напряжения питания двигателя аэродинамической трубы



Рис. 26. Данное напряжение
соответствует скорости
воздушного потока 1 м/с



Рис. 27. Максимальный поворот
флюгарки при данной скорости
воздушного потока



Рис. 28. Данное напряжение соответствует скорости воздушного потока 5,5 м/с

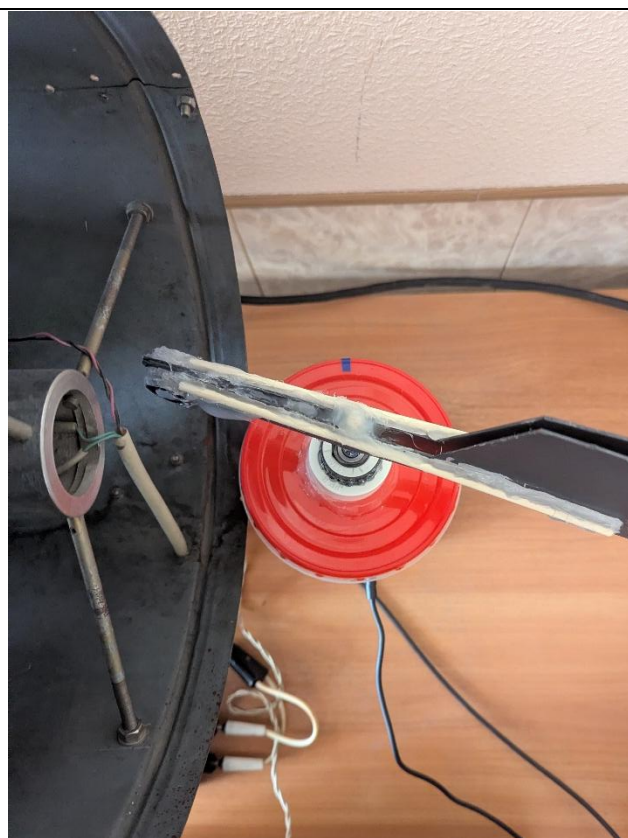


Рис. 29. Максимальный поворот флюгарки при данной скорости воздушного потока

Испытания в аэродинамической трубе показали, что из-за высокого трения в подшипниках и неоптимальной аэродинамики флюгарки прототип не обеспечивает корректное ориентирование по потоку при скоростях ветра ниже 4–5 м/с. При 1 м/с отклонение от истинного направления составило более 40°, что неприемлемо для метеорологических целей. Данный результат не свидетельствует о недостатках датчика AS5600, а указывает на необходимость доработки механической части — прежде всего замены подшипников на малофрикционные, снижения момента инерции флюгарки и изменение её конструкции.

В ходе проведения лабораторных испытаний была выявлена важная практическая проблема: после каждого отключения питания прибор терял информацию о направлении на истинный север и требовал повторной ручной

калибровки. Это существенно снижало удобство эксплуатации флюгера в полевых условиях.

Для решения данной задачи программный код был доработан. В обновлённую версию добавлена функция калибровки «севера» с сохранением значения смещения (offset) в энергонезависимую память EEPROM микроконтроллера. Теперь оператор может направить флюгер на истинный север и отправить в Serial Monitor команду cal. После этого прибор автоматически запоминает текущее положение как 0° и при последующих включениях сразу показывает корректный азимут без дополнительной настройки.

```
1  #include "AS5600.h"
2  #include <EEPROM.h>
3
4  AS5600 as5600;
5
6  int offset = 0;           // Смещение (калибровка севера)
7  const int eeAddress = 0;  // Адрес в EEPROM
8
9  void setup() {
10     Serial.begin(115200);
11     Wire.begin();
12
13     as5600.begin(4);
14     as5600.setDirection(AS5600_CLOCK_WISE);
15
16     // Загружаем offset из EEPROM
17     EEPROM.get(eeAddress, offset);
18
19     Serial.print("Connect: ");
20     Serial.println(as5600.isConnected() ? "AS5600 connected" : "AS5600 not found");
21     Serial.print("Loaded offset: ");
22     Serial.println(offset);
23     delay(1000);
24 }
25
26 void loop() {
27     int raw = as5600.rawAngle();
28
29     if (raw >= 0 && raw < 4096) {
30         float angle = raw * 360.0 / 4096.0;
31         float trueAngle = fmod((angle - offset + 360.0), 360.0); // Применяем калибровку
32
33         String rumb = getRumb(trueAngle);
34
35         Serial.print("Angle: ");
36         Serial.print(trueAngle, 2);
37         Serial.print("° | Raw: ");
38         Serial.print(raw);
39         Serial.print(" | AGC: ");
40         Serial.print(as5600.readAGC());
41         Serial.print(" | Rumb: ");
42         Serial.println(rumb);
43     }
44     else {
45         Serial.println("Error: Invalid raw angle");
46     }
47
48     // Команда калибровки: отправь "cal" в Serial Monitor
```

Рис. 30. Часть обновленного кода прошивки

```

48 // Команда калибровки: отправь "cal" в Serial Monitor
49 if (Serial.available()) {
50     String cmd = Serial.readStringUntil('\n');
51     cmd.trim();
52     if (cmd == "cal") {
53         int rawCal = as5600.rawAngle();
54         offset = round(rawCal * 360.0 / 4096.0);
55         EEPROM.put(eeAddress, offset); // Сохраняем в EEPROM
56         Serial.print("Calibration successful! New North offset: ");
57         Serial.println(offset);
58     }
59 }
60
61 delay(2000);
62 }
63
64 // Функция определения 16 румбов
65 String getRumb(float angle) {
66     if (angle >= 348.75 || angle < 11.25) return "N";
67     else if (angle >= 11.25 && angle < 33.75) return "NNE";
68     else if (angle >= 33.75 && angle < 56.25) return "NE";
69     else if (angle >= 56.25 && angle < 78.75) return "ENE";
70     else if (angle >= 78.75 && angle < 101.25) return "E";
71     else if (angle >= 101.25 && angle < 123.75) return "ESE";
72     else if (angle >= 123.75 && angle < 146.25) return "SE";
73     else if (angle >= 146.25 && angle < 168.75) return "SSE";
74     else if (angle >= 168.75 && angle < 191.25) return "S";
75     else if (angle >= 191.25 && angle < 213.75) return "SSW";
76     else if (angle >= 213.75 && angle < 236.25) return "SW";
77     else if (angle >= 236.25 && angle < 258.75) return "WSW";
78     else if (angle >= 258.75 && angle < 281.25) return "W";
79     else if (angle >= 281.25 && angle < 303.75) return "WNW";
80     else if (angle >= 303.75 && angle < 326.25) return "NW";
81     else if (angle >= 326.25 && angle < 348.75) return "NNW";
82     else return "ERR";
83 }

```

Рис. 31. Часть обновленного кода прошивки

```

Angle: 341.17° | Raw: 457 | AGC: 8 | Rumb: NNW
Angle: 341.25° | Raw: 458 | AGC: 8 | Rumb: NNW
Angle: 341.25° | Raw: 458 | AGC: 8 | Rumb: NNW
Angle: 341.34° | Raw: 459 | AGC: 8 | Rumb: NNW
Calibration successful! New North offset: 40
Angle: 0.34° | Raw: 459 | AGC: 8 | Rumb: N
Angle: 0.34° | Raw: 459 | AGC: 8 | Rumb: N

```

Рис. 32. Пример вывода обновленного кода. Видно, что после ввода команды «cal» (в строке вывода это отражено сообщением о успешной калибровке) прибор принял новый север, который будет запомнен управляющей платой после перезапуска.

3.4 Выводы по главе 3

Практическая часть работы подтвердила возможность эффективного применения датчика Холла AS5600 для измерения направления ветра. Экспериментальные исследования показали, что сам магнитный энкодер работает стабильно и с высокой точностью: разрешение составляет $0,0879^\circ$, а погрешность измерения угла не превышает $0,1^\circ$. Отсутствие «мёртвой зоны» и стабильность показаний при повторных измерениях свидетельствуют о корректности выбранного технического решения на уровне электроники и программного обеспечения.

В ходе испытаний было установлено, что основные ограничения прототипа носят исключительно механический характер. Высокое трение в подшипниках и недостаточная аэродинамическая оптимизация флюгарки приводят к неудовлетворительной пороговой скорости. Данный недостаток не связан с работой датчика AS5600, а обусловлен особенностями конструкции оси и флюгарки.

Таким образом, исследование подтвердило высокую применимость датчика Холла AS5600 для создания электронных флюгеров. Датчик обеспечивает требуемую точность, стабильность и надёжность. Основные направления дальнейшего совершенствования связаны с оптимизацией механической части прибора: снижением трения в подшипниках, уменьшением момента инерции флюгарки и улучшением её аэродинамических характеристик.

Разработанный прототип демонстрирует принципиальную возможность создания простого, недорогого и надёжного отечественного датчика направления ветра, пригодного для использования в метеорологических наблюдениях, ветроэнергетике и автономных системах мониторинга окружающей среды.

Заключение

В ходе выполнения дипломной работы были получены следующие результаты:

В первой главе был проведен теоретический анализ ветра как объекта измерений. Рассмотрены существующие типы анеморумбометров, выделены их достоинства и недостатки. Особое внимание уделено переходу от контактных потенциометрических схем к бесконтактным магнитным методам, обеспечивающим более высокую надежность.

Вторая глава посвящена детальному изучению датчика AS5600. Были проанализированы его архитектура, режимы работы и способы передачи данных (I2C, аналоговый выход, ШИМ). Обоснован выбор данного сенсора как оптимального по соотношению цены, разрешения (12 бит) и энергопотребления для малых метеостанций.

В третьей главе описан процесс проектирования и сборки экспериментального образца. Была разработана электронная схема сопряжения с микроконтроллером и спроектирован корпус устройства. Проведенные испытания позволили подтвердить заявленные характеристики в реальных условиях эксплуатации. Полученная точность ($0,1^\circ$) многократно превышает требования ВМО ($5,0^\circ$) и российских стандартов (10° для авиации).

Итоговый вывод по работе

Проведенное исследование полностью подтвердило возможность и эффективность применения датчика Холла AS5600 для измерения направления ветра. Устройство обеспечивает требуемую метеорологическую точность и высокую стабильность показаний при отсутствии дрейфа, характерного для контактных систем. Установлено, что основные ограничения системы носят не электронный, а механический характер, связанный с инерционностью флюгера и трением в узлах вращения.

Направления дальнейшей работы

Разработанный модуль является базой для создания полностью автономной автоматизированной метеостанции. Дальнейшее развитие проекта предполагает:

1. Техническую оптимизацию: использование малофрикционных подшипников для снижения порога чувствительности, изменение конструкции флюгарки и разработку герметичного корпуса с классом защиты IP65.
2. Расширение функционала: проектирование на базе датчиков Холла (AS5600 или аналогов) сопутствующих метеорологических приборов. В частности, адаптация магнитного принципа для измерения скорости ветра (анемометр), уровня осадков (весовой или челночный осадкомер) и атмосферного давления (барометр-анероид с магнитным съемом данных).
3. Автономизацию и связь: интеграцию системы с солнечными панелями и аккумуляторами, а также реализацию беспроводной передачи данных по протоколам LoRa или Wi-Fi для удаленного мониторинга.

Список литературы

1. **Guide to Instruments and Methods of Observation** : WMO-No. 8. Volume V – Quality Assurance and Management of Observing Systems. – 2023 edition. – Geneva : World Meteorological Organization, 2023. – 168 p. – ISBN 978-92-63-10008-5. – Текст : электронный // amc.namem.gov.mn : [сайт]. – URL: https://amc.namem.gov.mn/wp-content/uploads/WMO/1.%208_V-2023_en.pdf (дата обращения: 22.04.2026).
2. **Guide to Instruments and Methods of Observation** : WMO-No. 8. Volume I – Measurement of Meteorological Variables. – 2021 edition. – Geneva : World Meteorological Organization, 2021. – 581 p. – Текст : электронный // фумо05.рф

- : [сайт]. – URL: https://фумо05.пф/edumat/wmo/8_I_0.pdf (дата обращения: 22.04.2026).
3. **Автономная метеорологическая станция АМК-03** : описание типа средства измерений : № 36115-07 в Государственном реестре средств измерений / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Москва, 2007. – 5 с. – Текст : электронный // sapr.d.ru : [сайт]. – URL: <https://sapr.d.ru/grsi/36115-07/> (дата обращения: 22.04.2026).
 4. **Об утверждении Федеральных авиационных правил «Требования к операторам аэродромов гражданской авиации»** : Приказ Росавиации от 14.11.2024 № АЯ-340. – Текст : электронный // Федеральное агентство воздушного транспорта : официальный сайт. – URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/a/7/2/3/0/a72300e09127a295dc84061799271a95.pdf> (дата обращения: 22.04.2026).
 5. **Современные методы измерений параметров ветра** : материалы научно-практического семинара. – Новосибирск : ФГБУ «СибНИГМИ», 2022. – Текст : электронный. – URL: <https://sibnigmi.ru/documents/present7.pdf> (дата обращения: 22.04.2026).
 6. **Автономная метеорологическая станция АМК-03** : технические характеристики и поверка. – Текст : электронный // Все приборы : [информационный портал]. – URL: <https://all-pribors.ru/opisanie/36115-07-avtonomnaya-meteorologiceskaya-stanciya-amk-03> (дата обращения: 22.04.2026).
 7. **Исследование методов и технических средств получения информации о параметрах ветра в морских условиях** // Russian Arctic : [научный журнал]. – 2021. – № 12. – Текст : электронный. – URL: <https://russian-arctic.info/info/articles/meteorologiya/issledovanie-metodov-i-tekhnicheskikh-sredstv-polucheniya-informatsii-o-parametrakh-vetra-v-morskikh/> (дата обращения: 22.04.2026).

8. **Флюгер с легкой и тяжелой доской (Вильда)** : описание и методика наблюдений. – Текст : электронный // Meteoweb.ru : [сайт]. – URL: <http://meteoweb.ru/phen014.php> (дата обращения: 22.04.2026).
9. **РД 52.04.168–2001. Наблюдения на гидрометеорологической сети** : Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть 1. – Москва : Гидрометеиздат, 2001. – Текст : электронный // Стройинформ : [база нормативных документов]. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/169/16974.pdf> (дата обращения: 22.04.2026).
10. **WMO-No. 8. Volume II – Measurement of Cryospheric Variables** : Guide to Instruments and Methods of Observation. – Geneva : World Meteorological Organization, 2023. – Текст : электронный // Scribd : [цифровая библиотека]. – URL: <https://www.scribd.com/document/342072469/wmo-no-8-2> (дата обращения: 22.04.2026).
11. **The Weather Observer's Handbook** : Measuring Wind Speed and Direction / edited by Stephen Burt. – Cambridge : Cambridge University Press, 2012. – pp. 142–175. – ISBN 978-1107662285. – Текст : электронный // Cambridge Core : [сайт]. – URL: <https://www.cambridge.org/core/books/weather-observers-handbook/measuring-wind-speed-and-direction/> (дата обращения: 22.04.2026).
12. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation** : WMO-No. 8 for CWOP Observers. – Silver Spring : National Weather Service, 2018. – Текст : электронный. – URL: <https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf> (дата обращения: 22.04.2026).
13. **Техническое обслуживание и метрологический контроль флюгеров** : методические указания. – Текст : электронный // Метеоприбор : [сайт]. – URL: https://meteopribor.nt-rt.ru/images/manuals/fluger_specifications.pdf (дата обращения: 22.04.2026).
14. **Поверка анемометров и измерителей параметров потока воздуха** : регламент и методы. – Текст : электронный // Геометрология : [сайт]. – URL: https://www.geometrology.ru/poverka_sredstv_izmerenii_parametrov_potoka_ras

- [hoda_yrovnya_i_obema_veshestv/poverka_anemometrov](https://ru.scribd.com/document/730783985/wmo-no-8-eng) (дата обращения: 22.04.2026).
15. **WMO-No. 8 – Guide to Instruments and Methods of Observation (English version)**. – 2023 provisional edition. – Текст : электронный // Scribd : [цифровая библиотека]. – URL: <https://ru.scribd.com/document/730783985/wmo-no-8-eng> (дата обращения: 22.04.2026).
16. **Наука и производство Урала** : сборник научных трудов / под ред. Н. В. Котельниковой. – Новотроицк : НФ НИТУ «МИСиС», 2017. – Вып. 13. – 234 с. – Текст : электронный. – URL: https://nf.misis.ru/download/nis/Наука_и_производство_Урала_2017.pdf (дата обращения: 22.04.2026).
17. **Калинин, С. Н.** Исследование характеристик датчиков Холла в задачах прецизионных измерений / С. Н. Калинин. – Текст : электронный // eLIBRARY.RU : [научная электронная библиотека]. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=exrbiu> (дата обращения: 22.04.2026).
18. **Hall, E. H.** On a New Action of the Magnet on Electric Currents / E. H. Hall. – Текст : электронный // American Journal of Mathematics. – 1879. – Vol. 2, No. 3. – pp. 287–292. – URL: <https://www.jstor.org/stable/2369245?seq=1> (дата обращения: 22.04.2026).
19. **Quantum anomalous Hall effect for metrology** / J. Saunders [et al.]. – Manchester : University of Manchester, 2021. – Текст : электронный. – URL: <https://research.manchester.ac.uk/en/publications/quantum-anomalous-hall-effect-for-metrology/> (дата обращения: 22.04.2026).
20. **Hall effect sensor drift temperature compensation methods** : technical review. – Текст : электронный // Eureka.Patsnap : [database]. – URL: <https://eureka.patsnap.com/article/hall-effect-sensor-drift-temperature-compensation-methods> (дата обращения: 22.04.2026).
21. **Popovic, R. S.** Hall Effect Sensors: A Review / R. S. Popovic, M. A. M. Gijs. – Текст : электронный // Sensors. – 2013. – Vol. 13, No. 2. – pp. 2093–2110. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/13/2/2093> (дата обращения: 22.04.2026).

22. **Hall-Effect IC Applications Guide** : technical document. – Manchester, NH : Allegro MicroSystems, 2023. – 38 p. – Текст : электронный. – URL: <https://www.allegromicro.com/en/insights-and-innovations/technical-documents/hall-effect-sensor-ic-publications/hall-effect-ic-applications-guide> (дата обращения: 22.04.2026)..
23. **Белов, А. А.** Особенности реализации автономной метеостанции на базе микроконтроллера ESP32 / А. А. Белов, К. Е. Аббакумов. – Текст : электронный // КиберЛенинка : [научная электронная библиотека]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-realizatsii-avtonomnoy-meteostantsii-na-baze-mikrokontrollera-esp32> (дата обращения: 22.04.2026).
24. **Introduction to Encoders** : application note. – Beaverton : Sensoray, 2020. – Текст : электронный. – URL: <https://www.sensoray.com/support/appnotes/encoders.htm> (дата обращения: 22.04.2026).
25. **AS5600 12-Bit Programmable Contactless Potentiometer** : Datasheet. – Premstaetten : ams-OSRAM AG, 2022. – 33 p. – Текст : электронный. – URL: <https://look.ams-osram.com/m/7059eac7531a86fd/original/AS5600-DS000365.pdf> (дата обращения: 22.04.2026).
26. **Hall Effect Sensors: A Comprehensive Guide** : educational resource. – Kirkland : Monolithic Power Systems, 2024. – Текст : электронный. – URL: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/hall-effect-sensors-a-comprehensive-guide> (дата обращения: 22.04.2026).
27. **Hall effect sensors basics and their applications in aerospace** / Ersae Electronics. – 2023. – Текст : электронный. – URL: <https://www.ersaelectronics.com/blog/hall-effect-sensors-basics-and-their-applications-in-aerospace> (дата обращения: 22.04.2026).
28. **High-Performance Hall-Effect Sensors** : advanced research / MDPI Sensors Journal. – 2013. – Текст : электронный. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/13/2/2093> (дата обращения: 22.04.2026).
29. **Methods for compensating temperature drift in Hall sensors** : analytical review. – 2023. – Текст : электронный. – URL: <https://eureka.patsnap.com/article/hall->

[effect-sensor-drift-temperature-compensation-methods](#) (дата обращения: 22.04.2026).

30. **Мартыненко, П. П.** Разработка и исследование измерительных преобразователей на основе эффекта Холла : диссертация / П. П. Мартыненко. – Минск : БНТУ, 2015. – Текст : электронный // Репозиторий БНТУ. – URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/30008> (дата обращения: 22.04.2026).
31. **Зуев, С. А.** Современные подходы к автоматизации метеорологического мониторинга / С. А. Зуев, Н. П. Петров. – Текст : электронный // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – № 10. – С. 54–60. – URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13533> (дата обращения: 22.04.2026).