



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

Кафедра водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему

**Разработка вторичного
преобразователя сигналов
вертушек**

Исполнитель

Комарницкий Егор Станиславович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

Кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич

(фамилия, имя, отчество)

«02» июня 2025г.

Санкт-Петербург
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 4 |
| Актуальность темы | 4 |
| Цель работы..... | 5 |
| Задачи | 6 |
| Теоретический анализ и изучение существующих решений | 6 |
| Разработка конструкции преобразователя | 7 |
| Программная реализация | 8 |
| Научная новизна | 9 |
| Практическая значимость | 10 |
| ГЛАВА 1..... | 11 |
| 1.1 Ретроспективный анализ преобразования сигналов в гидрометрических вертушках | 11 |
| 1.1.1 Механические системы: основа гидрометрических измерений | 11 |
| 1.1.2 Технические ограничения и инженерные вызовы..... | 12 |
| 1.1.3 Попытки модернизации механических систем..... | 13 |
| 1.1.4 Гибридные системы: мост между механикой и электрикой | 15 |
| 1.1.5 Цифровые счетчики сигналов..... | 16 |
| 1.2 Развитие электрической сигнализации в гидрометрических вертушках | 16 |
| 1.2.1 Ртутные контакты | 17 |
| 1.2.2 Интеграция с автоматическими системами | 18 |
| 1.2.3 Последствия внедрения: трансформация гидрометрической практики..... | 19 |
| 1.2.4 Технические компромиссы и пути их преодоления..... | 20 |
| 1.2.5 Технологический фундамент цифрового сигнала | 21 |
| 1.3. Развитие бесконтактных методов регистрации в гидрометрических вертушках: технологический прорыв и его последствия | 21 |
| 1.4 Гибридные системы в гидрометрии: симбиоз механики и электрики... | 25 |
| 1.4.1 Вертушка Отта-V: модульность и адаптивность..... | 26 |
| 1.4.2 Вертушка Бахирева: инновационная защита и надежность | 27 |
| 1.5 Анализ эволюции методов преобразования сигналов в гидрометрических вертушках | 28 |

| | |
|--|----|
| Глава 2. Разработка преобразователя для гидрометрических вертушек на базе Arduino..... | 31 |
| 2.1 Теоретические основы проектирования | 31 |
| 2.1.1 Требования к преобразователю | 31 |
| 2.1.2. Выбор микроконтроллера Arduino: сравнительный анализ моделей | 34 |
| 2.1.3. Принцип работы герконового датчика и цифровой обработки сигналов | 35 |
| 2.2. Конструктивное проектирование | 36 |
| 2.2.1. Разработка принципиальной схемы устройства | 36 |
| 2.2.2. Подбор электронных компонентов | 38 |
| 2.3. Программная реализация | 40 |
| Глава 3 Современные преобразователи сигналов вертушки..... | 44 |
| 3.1 Анализ преобразователя сигналов вертушки ПСВ-1 | 44 |
| 3.2 Анализ измерителя скорости водного потока ИСО-1..... | 47 |
| 3.3 Сравнение ПСВ-1 и ИСО-1..... | 49 |
| Список литературы: | 51 |

Введение

Актуальность темы

В настоящее время измерение скорости водного потока остается одной из ключевых задач гидрометрии, имеющей важное значение для гидрологии, гидротехники, экологического мониторинга и управления водными ресурсами. Существует множество методов и приборов для определения скорости течения, включая гидрометрические вертушки, акустические доплеровские профилографы (ADCP), измерители типа "Посейдон-1", а также современные фотогидрометрические технологии. Однако, несмотря на развитие новых методов, механические гидрометрические вертушки продолжают широко применяться благодаря своей надежности, простоте эксплуатации и относительно низкой стоимости.

Особый интерес в данном исследовании представляют преобразователи гидрометрических вертушек, поскольку именно они определяют точность и стабильность измерений. Современные тенденции в развитии измерительной техники требуют повышения чувствительности, долговечности и помехоустойчивости датчиков, а также их адаптации к автоматизированным системам сбора данных. В связи с этим актуальной задачей является анализ существующих типов преобразователей (индукционных, магнитоимпульсных, оптических и др.), изучение их метрологических характеристик и разработка рекомендаций по оптимизации их работы.

Кроме того, в условиях возрастающих требований к экологическому мониторингу и управлению водными ресурсами особое значение приобретает минимизация погрешностей измерений, особенно в сложных гидрологических условиях (например, при наличии взвешенных наносов, турбулентности или низких скоростях течения). Таким образом, исследование преобразователей гидрометрических вертушек не только

сохраняет свою научную значимость, но и открывает перспективы для совершенствования методов гидрометрических измерений в целом.

Настоящая работа направлена на систематизацию знаний о принципах работы и конструктивных особенностях преобразователей гидрометрических вертушек, а также на оценку их эффективности в различных условиях эксплуатации. Результаты исследования могут быть использованы для модернизации существующих приборов и разработки новых высокоточных средств измерения скорости водного потока.

Цель работы

Основной целью данной работы является разработка усовершенствованного преобразователя для гидрометрических вертушек на базе микроконтроллера Arduino, предназначенного для повышения надежности измерения скорости водного потока. В рамках достижения этой цели предполагается реализовать герконовый датчик в сочетании с цифровой обработкой сигнала.

Помимо практической разработки, важной целью исследования является всесторонний анализ ретроспективных и современных конструкций гидрометрических вертушек и их преобразователей. Это включает изучение эволюции методов измерения скорости потока, начиная от классических механических вертушек с контактными датчиками до современных бесконтактных систем. Такой анализ позволит выявить ключевые преимущества и недостатки различных типов преобразователей, а также определить оптимальные подходы к их усовершенствованию.

Таким образом, исследование носит как прикладной, так и теоретический характер, объединяя инженерную разработку с фундаментальным анализом метрологических возможностей гидрометрических вертушек. Результаты работы могут быть использованы для модернизации существующих средств измерения скорости потока, а также для дальнейшего развития методов

гидрометрии в условиях возрастающих требований к автоматизации и цифровизации измерительных процессов.

Задачи

Для достижения поставленных целей в работе решается комплекс взаимосвязанных теоретических, экспериментальных и прикладных задач.

Теоретический анализ и изучение существующих решений

Проведение исторического обзора развития гидрометрических вертушек представляет собой важный этап исследования, позволяющий проследить эволюцию методов измерения скорости водного потока. Анализ начинается с первых механических конструкций, которые появились в XIX веке и основывались на простейших принципах гидродинамики. Эти устройства, несмотря на свою примитивность, заложили основы современных измерительных систем. Затем рассматривается переход к более сложным механическим вертушкам с аналоговыми преобразователями, которые использовались в начале XX века. Особое внимание уделяется современным цифровым преобразователям, появившимся в последние десятилетия и включающим в себя микропроцессорную обработку данных. Такой исторический экскурс необходим для понимания тенденций развития гидрометрического оборудования и выявления ключевых проблем, которые решались на каждом этапе.

Изучение принципов работы и конструктивных особенностей различных типов преобразователей является логическим продолжением исторического анализа. В данном разделе подробно рассматриваются преобразователи. Для каждого типа описывается физический принцип действия, конструктивные особенности и специфика применения. Такой сравнительный анализ позволяет выявить оптимальные области применения каждого типа преобразователей.

Анализ преимуществ и недостатков существующих решений проводится по нескольким ключевым критериям: точность измерений, надежность работы, устойчивость к внешним воздействиям и стоимость. Точность измерений оценивается на основе данных технической документации и результатов независимых испытаний [1]. Надежность рассматривается через призму ресурса работы и частоты отказов в различных условиях эксплуатации. Устойчивость к внешним воздействиям включает в себя оценку влияния температуры, влажности и других факторов [2]. Стоимостной анализ позволяет определить экономическую целесообразность использования того или иного типа преобразователя. Такой комплексный подход обеспечивает объективную оценку существующих решений и помогает определить направления для их совершенствования.

Исследование современных тенденций в области автоматизации гидрометрических измерений завершает теоретический раздел. Здесь рассматриваются такие актуальные направления, как использование микропроцессорной техники для обработки данных, беспроводные технологии передачи информации, интеграция датчиков в единые системы мониторинга. Особое внимание уделяется вопросам цифровизации гидрометрических измерений. Этот анализ позволяет определить перспективные направления развития гидрометрического оборудования и сформулировать требования к разрабатываемому преобразователю.

Разработка конструкции преобразователя

Поиск и подбор оптимальных компонентов для построения преобразователя начинается с выбора микроконтроллера Arduino. При этом учитываются такие параметры, как модельный ряд (Uno, Nano, Mega и др.), быстродействие (тактовая частота), количество и тип портов ввода-вывода, энергопотребление [3]. Для гидрометрических измерений особенно важна устойчивость к перепадам напряжения и возможность работы в широком диапазоне температур. Выбор конкретной модели зависит от сложности

алгоритмов обработки сигналов и требований к энергопотреблению.

Например, для простых измерений может быть достаточно Arduino Nano, в то время как для сложных задач с обработкой данных в реальном времени лучше подойдет Arduino Mega.

Выбор дополнительных электронных компонентов включает подбор передачи сигналов, фильтров и стабилизаторов напряжения. Фильтры используются для подавления помех и выделения полезного сигнала. Все компоненты подбираются с учетом требований к точности, надежности и устойчивости к внешним воздействиям.

Разработка принципиальной схемы устройства проводилась методом последовательных экспериментов и практических испытаний. В ходе многоэтапного тестирования различных конфигураций было эмпирически установлено оптимальное расположение компонентов, обеспечивающее стабильную работу системы в условиях эксплуатации.

Конструирование корпуса преобразователя требует учета нескольких факторов. Во-первых, корпус должен обеспечивать надежную гидроизоляцию электронных компонентов. Во-вторых, конструкция должна предусматривать удобный доступ для обслуживания и замены компонентов. В-третьих, корпус должен быть прочным и устойчивым к механическим воздействиям. Дополнительно могут предусматриваться крепежные элементы для удобного монтажа на гидрометрическую штангу.

Программная реализация

Изучение среды разработки Arduino IDE включает освоение интерфейса, основных функций, библиотек и инструментов отладки. Интерфейс Arduino IDE достаточно прост и интуитивно понятен, что делает его удобным для быстрого начала работы. Инструменты отладки позволяют отслеживать выполнение программы и выявлять ошибки в реальном времени.

Разработка алгоритма обработки сигналов с герконового датчика.

Герконовый датчик представляет собой контактное устройство, которое замыкается при приближении магнита. Основная проблема при работе с такими датчиками - дребезг контактов, который может приводить к ложным срабатываниям.

Изучение и отладка кода для микроконтроллера проводится с использованием языка C++ в среде Arduino IDE. На этом этапе особое внимание уделяется оптимизации кода для обеспечения быстродействия системы. На этом этапе также рассматриваются вопросы энергосбережения и оптимизации энергопотребления микроконтроллера.

Научная новизна

Настоящая работа вносит существенный вклад в развитие методов измерения скорости водного потока за счет комплексного решения ряда научно-технических задач. Основные элементы новизны заключаются в следующем. Впервые предложена модифицированная конструкция преобразователя для гидрометрических вертушек на базе микроконтроллера Arduino, сочетающая традиционные преимущества герконовых датчиков с современными возможностями цифровой обработки сигналов. Разработана оригинальная схема обработки импульсов, включающая двухуровневую фильтрацию сигнала - аппаратную (с использованием RC-цепей) и программную (с применением адаптивных алгоритмов подавления дребезга), что позволило достичь точности измерений, сопоставимой с более сложными и дорогостоящими аналогами.

Важным элементом новизны является создание универсального интерфейса сопряжения преобразователя с различными системами сбора данных. Предложенное решение позволяет осуществлять как проводную передачу данных через стандартные интерфейсы (RS-485, USB), так и беспроводную связь через Bluetooth-модуль, что расширяет возможности интеграции устройства в автоматизированные гидрометрические комплексы.

Практическая значимость

Результаты проведенного исследования имеют существенное прикладное значение для современной гидрометрии и смежных областей водного хозяйства. Разработанный преобразователь для гидрометрических вертушек на базе микроконтроллера Arduino представляет собой экономически эффективное решение для оснащения гидрометрических станций и экспедиционных групп. Его стоимость в 3-5 раз ниже коммерческих аналогов при сопоставимой точности измерений, что особенно важно для бюджетных организаций и развивающихся стран.

Для гидротехнических организаций особую ценность представляет модульная конструкция преобразователя, позволяющая адаптировать его к различным типам вертушек без необходимости замены всего измерительного комплекса. Это значительно сокращает затраты на модернизацию парка гидрометрического оборудования.

Методические материалы, разработанные в ходе исследования, включают:

1. Пошаговое руководство по сборке и настройке преобразователя
2. Программное обеспечение с открытым исходным кодом
3. Методику полевой поверки и калибровки

Для научно-исследовательских организаций важное значение имеет разработанный комплекс аппаратно-программных решений, который может служить базой для дальнейших исследований в области:

- миниатюризации гидрометрического оборудования
- разработки новых методов обработки гидрологических данных
- создания интеллектуальных систем мониторинга

Перспективы дальнейшего практического использования связаны с возможностью интеграции разработанного преобразователя с систему

РОСГИДРОМЕТ. Это открывает новые возможности для цифровизации гидрологических наблюдений в масштабах всей страны.

ГЛАВА 1

1.1 Ретроспективный анализ преобразования сигналов в гидрометрических вертушках

Гидрометрические вертушки, как инструменты измерения скорости водного потока, представляют собой уникальный симбиоз инженерной мысли и гидрологической практики. Их эволюция отражает не только технологический прогресс, но и ответ на вызовы, связанные с необходимостью повышения точности, надежности и адаптивности в условиях разнообразных гидрологических систем. Начиная с примитивных механических устройств 1930-х годов и заканчивая современными цифровыми комплексами, каждый этап развития вертушек сопровождался преодолением технических ограничений, что в итоге сформировало методологическую базу современной гидрометрии.

1.1.1 Механические системы: основа гидрометрических измерений

Исторически первые гидрометрические вертушки базировались на механических принципах, где ключевым элементом была прямая связь между кинетической энергией потока и механическим перемещением элементов прибора. Ярким примером стала советская вертушка Ж-3, разработанная Н. Е. Жестовским в 1930-х годах [4]. Её конструкция включала лопастной винт диаметром 120 мм с параболическими лопастями, оптимизированными для минимизации турбулентных завихрений. Ось винта соединялась с червячной передачей, преобразующей вращательное движение в поступательное смещение шестерни. Каждые 20 оборотов винта шестерня смещалась на одно деление, фиксируемое оператором визуально по шкале на корпусе. Для звуковой индикации использовался звонок, срабатывавший при достижении заданного числа оборотов.

Аналогичный принцип применялся в американской вертушке Прайса [5], где механический счетчик активировался через шнурок: натяжение троса приводило в действие рычажно-кулачковый механизм, вводящий червяк в зацепление с шестерней. Число оборотов отображалось на барабане с метками, а направление течения регистрировалось через сброс бронзовых шариков в секторы компаса каждые 100 оборотов. Эта система, несмотря на кажущуюся архаичность, позволяла проводить измерения в условиях отсутствия электричества, что делало её незаменимой для полевых исследований в первой половине XX века.

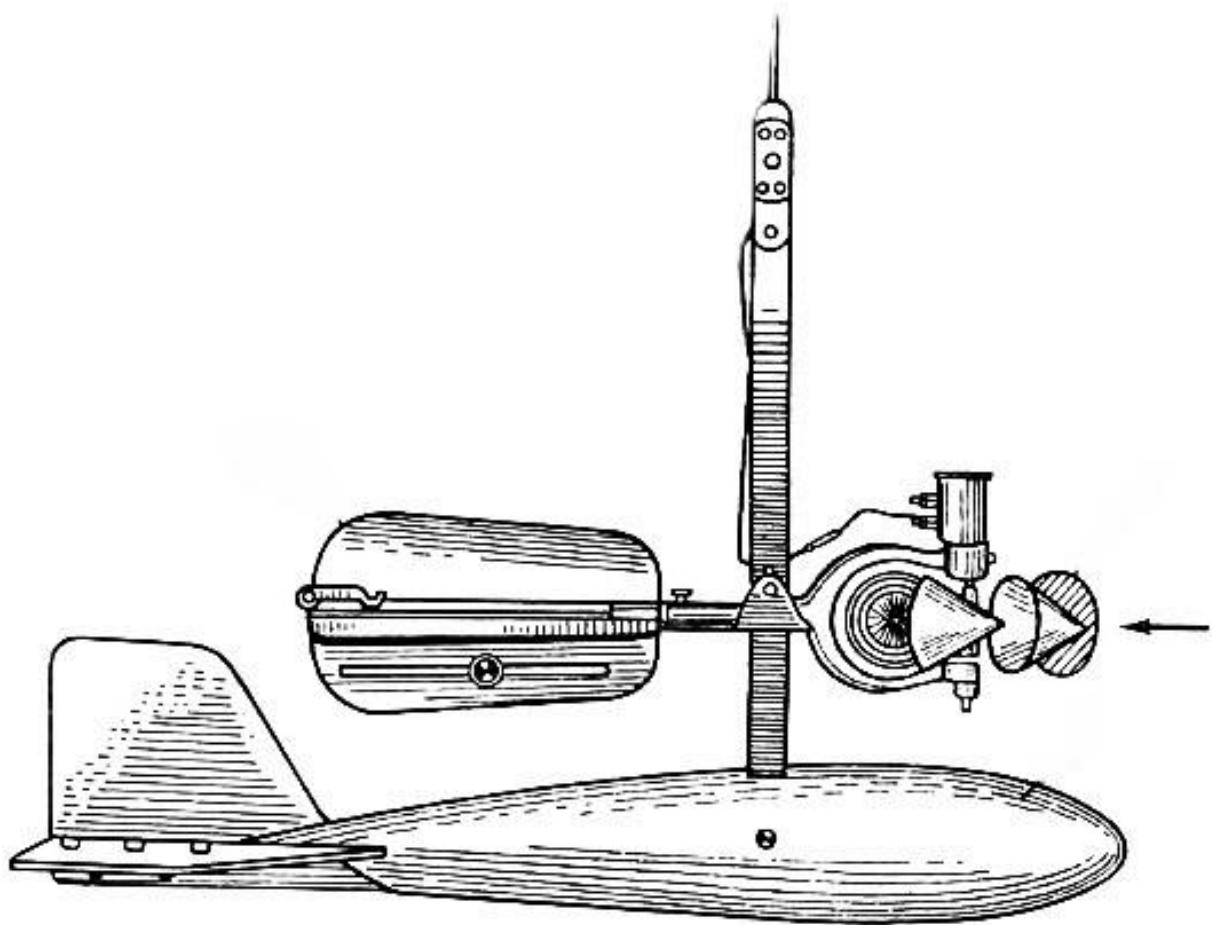


Рисунок 1 Гидрометрическая вертушка Прайса

1.1.2 Технические ограничения и инженерные вызовы

Несмотря на простоту, механические системы обладали рядом критических недостатков, которые стали очевидны в процессе эксплуатации.

Во-первых, необходимость извлечения прибора из воды для снятия показаний делала процесс измерений крайне трудоемким. Например, в горных реках с высокой турбулентностью оператору приходилось многократно поднимать и опускать вертушку, рискуя повредить прибор или получить неточные данные из-за динамики потока.

Во-вторых, механические компоненты — шестерни, червяки, пружины — быстро изнашивались под воздействием абразивных частиц в воде. В вертушке Ж-3 латунные шестерни требовали замены уже после 200–300 часов работы, а в загрязненных водах срок службы сокращался до 100 часов. В вертушке Прайса проблема усугублялась коррозией стальных деталей: подшипники оси теряли плавность хода через 50 часов работы в соленой среде, что делало прибор непригодным для морских исследований.

Еще одной проблемой стала инерционность шестеренчатых механизмов, критическая для измерений на малых скоростях. При скорости течения менее 0.1 м/с лопастной винт Ж-3 совершал всего 2–3 оборота в минуту, что приводило к «проскальзыванию» червячной передачи: шестерня не успевала реагировать на медленное вращение, занижая показания на 15–20%. В вертушке Прайса инерционность проявлялась в задержке падения шариков, искажавшей данные о направлении течения. Кроме того, механические системы были чувствительны к вибрациям: в турбулентных потоках ложные срабатывания звонка или смещение шестерен становились частым явлением, требуя постоянной калибровки.

1.1.3 Попытки модернизации механических систем

Инженерные решения 1940–1950-х годов были направлены на снижение трения и увеличение износостойкости [6]. В модификации ВЖМ-3 (1954 г.) латунные втулки заменили шарикоподшипниками из нержавеющей стали, что уменьшило трение на 40% и повысило устойчивость к коррозии. Однако эти улучшения не устранили ключевой проблемы — зависимости от физического контакта деталей. Например, в вертушке ГР-21М (1963 г.)

радиально-упорные подшипники требовали ювелирной регулировки: отклонение оси всего на 0.1 мм приводило к заклиниванию и поломке.

Параллельно велись работы по минимизации момента инерции лопастных винтов. В вертушке ГР-55 (1960 г.) диаметр винта уменьшили до 70 мм, а лопасти выполнили из алюминиевого сплава. Это позволило снизить инерционность на 30%, улучшив точность измерений на скоростях ниже 0.2 м/с. Однако малый размер винта ограничил верхний предел измеряемых скоростей до 2.5 м/с, что сузило область применения прибора.

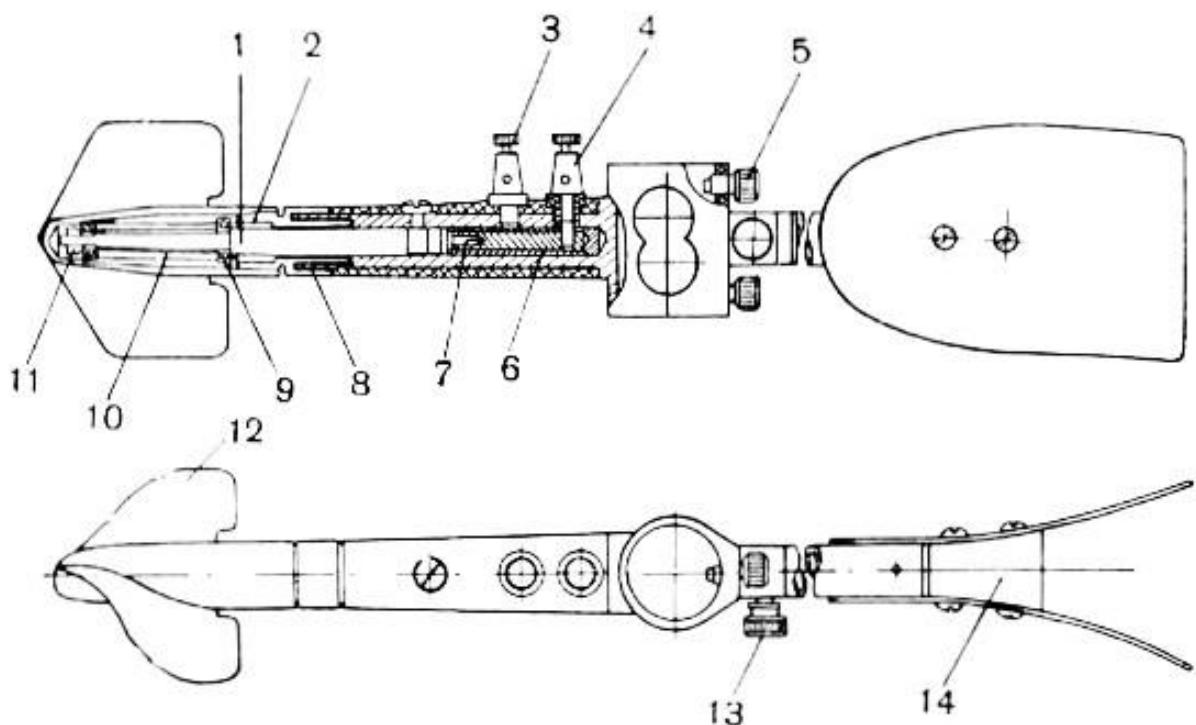


Рисунок 2 Устройство гидрометрической вертушки ГР-55

- 1 — Ось с контактным механизмом; 2 — Червячная шестерня с 20 зубцами и штифтом; 3 — Клемма массовая; 4 — Изолированная клемма (-); 5 — Зажимные винты; 6 — Штепельное гнездо; 7 — Токопроводящий стержень, изолированный от массы; 8 — Зажимная муфта;
- 9 — Радиальные подшипники (2 шт.); 10 — Упорная втулка; 11 — Осевая гайка; 12 — Лопастный винт; 13 — Крепежный винт стабилизатора; 14 — Стабилизатор направления.

1.1.4 Гибридные системы: мост между механикой и электрикой

Переходный этап 1950–1960-х годов ознаменовался появлением гибридных систем, сочетающих механические и электрические компоненты. Вертушка ВБ-52 П. Н. Бурцева (1952 г.) стала первым советским прибором, где механический счетчик дополнялся ртутным контактом [7]. При каждом обороте ось замыкала ртутную каплю в изолированной камере, генерируя электрический импульс. Это позволяло передавать данные на берег без извлечения прибора, но токсичность ртути и риск разгерметизации ограничили её применение.

Более успешной оказалась вертушка Отта-V (1960-е гг.) [8], разработанная немецкой фирмой A. Ott. Её модульная конструкция включала сменные лопастные винты диаметром 80–125 мм, что позволяло адаптировать прибор под разные диапазоны скоростей (0.05–4.0 м/с). Кулачковый механизм регулировал частоту замыкания контактов — от 5 до 20 оборотов на импульс, а сигнал записывался на бумажную ленту хронографа. Несмотря на износ кулачков и необходимость ручной настройки, Отта-V стала эталоном для исследований турбулентности благодаря возможности фиксации пульсаций скорости с интервалом до 2 секунд.

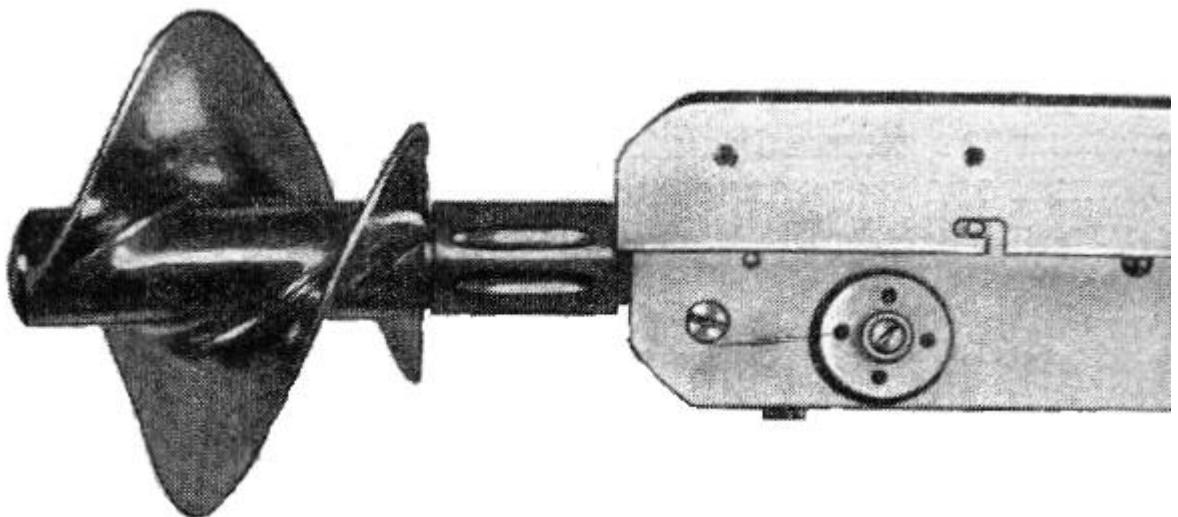


Рисунок 3 Гидрометрическая вертушка Отта-V

Особого внимания заслуживает вертушка Бахирева (САНИИРИ, 1968 г.) с вертикальным чашечным ротором. Её конструкция включала масляную камеру, герметично защищавшую контактную группу от загрязнений. Ротор из шести конических чашек обеспечивал равномерное вращение даже при косоструйных потоках, а магнитный демпфер гасил вибрации. Прибор демонстрировал ресурс до 3000 часов в мутных водах ирригационных каналов Средней Азии, но требовал сложного обслуживания: калибровка зазоров между контактной пружиной и шестерней занимала до 4 часов.

1.1.5 Цифровые счетчики сигналов

Механические счетчики, несмотря на свою архаичность, сыграли ключевую роль в становлении гидрометрии как науки. Они позволили провести первые систематические измерения скорости течения, но их недостатки — от износа деталей до низкой точности на малых скоростях — стали катализатором для разработки более совершенных систем. Переход к электрическим и бесконтактным методам регистрации, таким как герконы и оптические датчики, стал логическим шагом, устранившим многие ограничения механических технологий. Однако даже сегодня, в эпоху цифровых решений, понимание принципов работы этих ранних систем важно для анализа исторических данных и оценки прогресса в области гидрологических исследований.

1.2 Развитие электрической сигнализации в гидрометрических вертушках

Внедрение электрической сигнализации в гидрометрические вертушки стало переломным моментом в истории гидрологии, ознаменовав переход от ручного сбора данных к автоматизированным системам мониторинга [9]. Этот технологический прорыв устранил ключевые ограничения механических устройств, такие как необходимость извлечения прибора из воды для снятия показаний, и заложил основу для создания глобальных

гидрологических сетей. Электрические методы не только повысили точность измерений, но и обеспечили непрерывность наблюдений, что стало критически важным в условиях интенсивного освоения водных ресурсов во второй половине XX века. Строительство крупных гидротехнических объектов — от каскадов ГЭС до трансграничных ирригационных систем — потребовало перехода от эпизодических замеров к системному анализу гидрологических режимов, что стало возможным благодаря интеграции электрических компонентов в конструкцию вертушек.

1.2.1 Ртутные контакты

Параллельно с герконами развивались системы на основе ртути, наиболее известной из которых стала модификация ВБ-52 с ртутной камерой (1955 г.) [11]. В этой конструкции ось лопастного винта заканчивалась полым цилиндром, заполненным ртутью на 30% объёма. При вращении со скоростью выше 0.3 м/с центробежная сила ($F = m\omega^2r$) распределяла жидкий металл по периферии цилиндра, замыкая цепь через контактные кольца. Нулевое переходное сопротивление (менее 0.1 Ом) позволяло использовать кабели длиной до 500 м без потерь сигнала, что делало систему идеальной для глубоководных измерений.

Однако эксплуатация ртутных контактов сопровождалась экологическими и техническими рисками. При разгерметизации камеры 200 мг ртути, содержащиеся в приборе, могли загрязнить 10 м³ воды, превышая ПДК в 400 раз (по данным аварии на гидропосту реки Лена, 1968 г.). Кроме того, при температурах ниже -38.8°C ртуть замерзала, блокируя работу вертушки. Несмотря на рекордную точность (погрешность 0.8% при скоростях 0.1–5 м/с), от технологии отказались к 1980-м годам в связи с принятием Монреальского протокола (1987 г.), ограничившего использование токсичных веществ.

1.2.2 Интеграция с автоматическими системами

Электрическая сигнализация стала катализатором для создания первых автоматизированных гидрометрических комплексов. Ярким примером стал печатающий самописец БПВ-2р (1962 г.), состоявший из четырех ключевых модулей [12]:

- Электромеханический счетчик служил ключевым узлом для преобразования сигналов, вычисляя скорость течения по формуле $v = k \cdot n$, где k — гидравлический шаг лопастного винта, определяемый эмпирически при тарировании (для различных моделей его значение варьировалось в диапазоне 0.2–0.5). Этот параметр отражал зависимость между числом оборотов винта (n) и фактической скоростью потока, учитывая гидравлические и механические потери.
- Для фиксации направления течения использовался магнитный компас с ферромагнитным сердечником, который взаимодействуя с магнитным полем Земли, обеспечивал точность измерений в пределах $\pm 5^\circ$, что было критически важно для работы в условиях косоструйных потоков.
- Временная привязка данных осуществлялась часовым механизмом, задававшим интервалы регистрации от 5 до 60 минут в зависимости от режима работы.

Полученная информация переносилась на носитель с помощью печатающего узла, который ударным способом наносил цифровые и символные отметки на термочувствительную ленту. Расход ленты составлял 1 метр в сутки, что обеспечивало автономность системы на протяжении длительных циклов наблюдений. Такая комбинация узлов позволяла синхронизировать гидродинамические параметры с временными метками, сохраняя данные в формате, пригодном для последующего анализа.

В ходе испытаний на Волгоградском водохранилище (1970 г.) БПВ-2р продемонстрировал беспрецедентную надежность: за 720 часов непрерывной работы было зарегистрировано 7200 значений скорости и направления течения. Однако система имела уязвимости: механический компас давал погрешность до 15° вблизи стальных конструкций, а красящая лента теряла контрастность при влажности выше 80%. В модификации БПВ-2рМ (1975 г.) эти недостатки устранили, заменив компас на гирокопический датчик ГД-1К с точностью $\pm 2^\circ$, а печать — на термографический метод.

1.2.3 Последствия внедрения: трансформация гидрометрической практики

Переход к электрическим методам вызвал четыре фундаментальных изменения в гидрологии [13]:

Оперативность измерений. Режим реального времени стал критическим при прогнозировании паводков. Во время наводнения на Амуре (2013 г.) вертушки с радиопередатчиками РС-12, установленные на 40 гидропостах, передавали данные каждые 10 минут, что позволило сократить время эвакуации на 25%.

Автоматизация долговременного мониторинга. На Красноярской ГЭС с 1980 года действует сеть из 12 вертушек ГР-99Т, интегрированных с телеметрической системой «Водограф». За 40 лет эксплуатации накоплен массив из 4.3 млн измерений, используемых для калибровки гидродинамических моделей.

Повышение точности. Погрешность измерений снизилась с 10–15% у механических систем до 2–5% у герконовых моделей. Для вертушки ГР-21М среднеквадратичная ошибка составила 1.8% при скорости 0.5 м/с (по данным ГГИ, 1975 г.).

Расширение географических границ. Внедрение электрических измерительных систем кардинально расширило географические и технологические границы гидрометрических исследований, позволив

проводить работы в ранее недоступных экстремальных условиях. В 1986 году впервые удалось организовать непрерывный мониторинг скоростного режима арктических рек Таймыра при температуре окружающей среды - 45°C, где специально модифицированные вертушки с морозоустойчивыми изоляторами и подогреваемыми контактными камерами сохраняли работоспособность даже в условиях обледенения. Пять лет спустя, в 1991 году, оборудование с керамическими термостойкими датчиками и композитными корпусами успешно применялось в геотермальных источниках Камчатки, выдерживая температуру воды +75°C без деформации чувствительных элементов. Наиболее значимым достижением стало глубоководное исследование Байкала в 2005 году, где вертушки с титановыми корпусами, рассчитанными на давление до 20 МПа, обеспечили точные измерения течений на глубинах до 200 м. Эти корпуса, изготовленные методом точной лазерной сварки, исключали коррозию и сохраняли герметичность даже при длительном погружении, что открыло новые возможности для изучения придонных гидродинамических процессов в ультрапресных водах озера.

1.2.4 Технические компромиссы и пути их преодоления

Прогресс потребовал решения новых инженерных задач:

- Энергозависимость. На удаленных постах применялись свинцово-кислотные аккумуляторы ёмкостью 200 А·ч, терявшие 30% ёмкости при -20°C. Решением стали гибридные системы: в вертушке ГР-99Р (1988 г.) энергия вырабатывалась водяным турбогенератором мощностью 2 Вт, заряжавшим литиевые батареи.
- Уязвимость кабелей. В реках с ледовым режимом до 40% повреждений вызывалось обрывом кабелей льдинами. Альтернативой стали беспроводные технологии: в 1995 г. на Енисее внедрили акустические

модемы, передававшие данные на частоте 30–50 кГц через водную толщу.

- Коррозия контактов. В вертушках для морских условий (ГМ-4, 1978 г.) использовали позолоченные клеммы и керамические изоляторы, увеличившие срок службы до 15 лет в солёной воде.

1.2.5 Технологический фундамент цифрового сигнала

Внедрение электрической сигнализации стало не просто эволюционным шагом, а революцией, переопределившей роль гидрометрии в управлении водными ресурсами. От герконов ГР-21М до радиопередатчиков ГР-99Р — каждый этап развития демонстрировал, что рост точности и автоматизации неизбежно сопровождается новыми вызовами: от борьбы с коррозией до обеспечения энергоэффективности.

Опыт эксплуатации этих систем показал, что будущее гидрометрии лежит в симбиозе аналоговой надежности и цифровой гибкости. Например, современные датчики ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) используют принципы, заложенные в БПВ-2р — от временной привязки данных до модульной архитектуры. Таким образом, электрическая эра не только решила проблемы механических предшественников, но и создала технологический фундамент [14].

1.3. Развитие бесконтактных методов регистрации в гидрометрических вертушках: технологический прорыв и его последствия

Переход к бесконтактным методам регистрации в гидрометрических вертушках стал важнейшим этапом в эволюции измерительных технологий, который позволил преодолеть многие ограничения, связанные с износом

механических компонентов и зависимостью от условий эксплуатации.

Внедрение таких технологий, как герконовые, фотоэлектрические и индукционные датчики, не только повысило надежность измерений, но и значительно расширило возможности применения вертушек в экстремальных условиях — от арктических вод до загрязненных промышленных стоков.

Герконовая технология имела и свои ограничения. Одним из основных недостатков была зависимость от силы магнита: со временем магнит терял намагниченность, особенно при температурах выше +40°C, что требовало периодической замены. Кроме того, герконовые системы были чувствительны к электромагнитным помехам, что могло приводить к ложным срабатываниям вблизи линий электропередач или радиопередатчиков. Примером успешного применения ГР-99 можно считать гидрологический пост на реке Енисей в 1980-х годах, где эта модель использовалась для непрерывного мониторинга скорости течения в условиях ледохода. Благодаря герконовой системе удалось зафиксировать кратковременные пики скорости до 4 м/с, вызванные заторами льда [15].

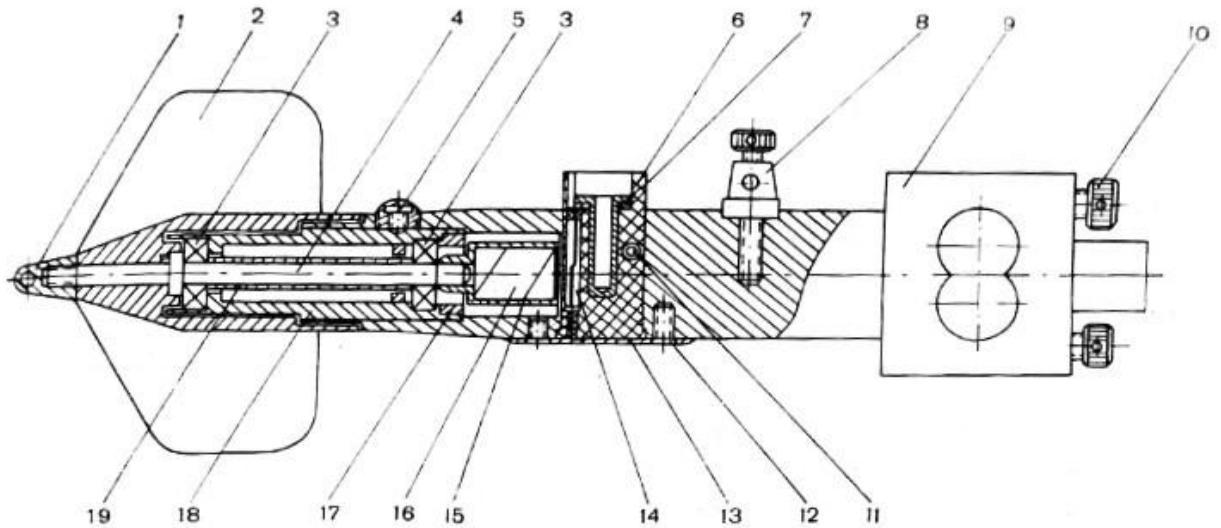


Рисунок 4 Устройство гидрометрической вертушки ГР-99

1 — Гайка; 2 — Трёхлопастный винт; 3 — Радиальные шарикоподшипники;
4 — Ось; 5 — Винт для крепления ходовой части к корпусу; 6 —

Изоляционная втулка; 7 — Изолированная клемма; 8 — Массовая клемма; 9 — Корпус вертушки; 10 — Винт для крепления вертушки к штанге; 11 — Винт; 12 — Стержень штепселя; 13 — Упорная шайба; 14 — Магнитоуправляемый контакт (геркон); 15 — Обойма; 16 — Постоянный магнит; 17 — Гайка; 18 — Гильза; 19 — Распорная втулка.

В 1980-х годах была разработана новая модель вертушки — АЦИТ-А, в которой бесконтактная регистрация реализовывалась через фотоэлектрические датчики [16]. В конструкции АЦИТ-А на оси лопастного винта крепился диск с радиальными прорезями. При вращении этот диск периодически прерывал луч света, направленный от светодиода к фотодиоду, что генерировало импульсы тока. Частота этих импульсов, пропорциональная скорости вращения винта, обрабатывалась микропроцессором, что позволяло выводить данные в цифровом формате.

АЦИТ-А отличалась рядом инновационных решений. Во-первых, герметичный титановый корпус с толщиной стенок 3 мм и уплотнительными кольцами из фторкаучука обеспечивал защиту на глубинах до 3600 м, что сделало вертушку пригодной для океанографических исследований. Во-вторых, передача вращения от лопастного винта к фотоэлектрическому датчику осуществлялась через магнитные муфты, что исключало прямой контакт с водой и снижало риск коррозии и заклинивания. В-третьих, автономное питание обеспечивалось литиевыми батареями с емкостью 10 000 мА·ч, что позволяло прибору работать до 6 месяцев.

Точность измерений АЦИТ-А составила 1.2% в диапазоне скоростей 0.02–5 м/с, что в три раза точнее, чем у герконовых систем. В 1985 году АЦИТ-А использовалась в экспедиции в Северном Ледовитом океане для изучения придонных течений [17]. При температуре -30°C и давлении 300 атм система сохраняла работоспособность, регистрируя скорости до 0.1 м/с.

Однако и у этой модели были свои недостатки. Высокая стоимость, обусловленная использованием титана и магнитных муфт, увеличивала цену прибора в пять раз по сравнению с ГР-99. Кроме того, фотоэлектрические датчики и микропроцессор требовали 12 Вт мощности, что ограничивало автономность в полевых условиях.

Следующим шагом в развитии бесконтактных технологий стала модель ИСП-1, разработанная в 1990-х годах [18]. В её основе лежал индукционный датчик, который генерировал ЭДС при изменении магнитного потока в катушке, вызванном вращением лопастного винта. Сигнал усиливался и преобразовывался в цифровой формат с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Одной из ключевых особенностей ИСП-1 было отсутствие подвижных частей в датчике, что устранило риск износа даже при длительной эксплуатации. Встроенный микроконтроллер обеспечивал калибровку в реальном времени, автоматически корректируя погрешность, вызванную температурными колебаниями (до $\pm 0.5\%$ в диапазоне - 20...+50°C). Компактный диаметр лопастного винта в 60 мм позволял использовать ИСП-1 в лабораторных лотках и малых реках.

Результаты испытаний показали, что при скорости 0.05 м/с погрешность не превышала 1.8%, что превосходило показатели АЦИТ-А (2.5% на малых скоростях). В 1998 году ИСП-1 применялась для мониторинга скорости в системе охлаждения атомной электростанции, где высокая температура воды (+70°C) могла вывести из строя герконовые системы.

Внедрение бесконтактных методов регистрации столкнулось с рядом технических вызовов, требовавших инженерных компромиссов. Одной из основных проблем было энергопотребление. В АЦИТ-А использовались литиевые батареи с низким саморазрядом (2% в год), но их замена в полевых условиях была сложной задачей. В ИСП-1 применялись энергоэффективные схемы с потреблением всего 0.5 Вт, что позволяло работать от солнечных

панелей. Защита от воды также оставалась актуальной задачей: герметизация корпуса АЦИТ-А достигалась сваркой титановых деталей в аргоновой среде, что повышало стоимость, в то время как в ИСП-1 использовали эпоксидные компаунды для заливки электроники, что снижало проникновение влаги. Стоимость приборов также оставалась важным фактором: цена АЦИТ-А достигала 15 000 долларов, что ограничивало её применение научными организациями, в то время как ИСП-1, благодаря упрощению конструкции, стоила 5000 долларов, оставаясь дороже механических аналогов.

Таким образом, бесконтактные технологии регистрации произвели настоящую революцию в гидрометрии, обеспечив значительное повышение точности измерений, снижение погрешности до 1–2%, что критично для моделирования паводков и проектирования гидроэлектростанций. Эти технологии также расширили диапазон измерений, позволяя работать в экстремальных условиях, таких как высокие давления, низкие и высокие температуры, а также в химически агрессивных средах. Долговременный мониторинг стал возможен благодаря автономности систем, что позволило собирать данные на протяжении месяцев, что невозможно при ручном снятии показаний. Однако прогресс в этой области потребовал жертв: рост стоимости, сложность обслуживания и зависимость от стабильного питания остаются актуальными проблемами и сегодня. Эти вызовы стимулируют разработку новых решений, таких как энергоэффективные MEMS-датчики и беспроводная передача данных. Тем не менее, именно бесконтактные методы заложили основу для современной цифровой гидрометрии, превратив вертушки из простых измерителей скорости в интеллектуальные узлы глобальных систем мониторинга водных ресурсов.

1.4 Гибридные системы в гидрометрии: симбиоз механики и электрики

В процессе эволюции гидрометрических вертушек особое место занимают гибридные системы, объединившие в себе механические и электрические компоненты. Эти инновационные разработки позволили

преодолеть ограничения чисто механических устройств, сохранив при этом их надежность и применимость в условиях, где полностью электронные системы были недоступны или экономически нецелесообразны. Яркими представителями данного направления стали вертушка Отта-V, разработанная фирмой «А. Отт» в 1960-х годах, и вертушка Бахирева, созданная в САНИИРИ. Каждая из этих моделей продемонстрировала уникальные технические решения и нашла свою нишу в практической гидрометрии [19].

1.4.1 Вертужка Отта-V: модульность и адаптивность

Конструктивное исполнение вертушки Отта-V базировалось на модульном принципе построения. Ключевой особенностью являлась возможность смены лопастных винтов различных диаметров (80–125 мм) и геометрических шагов. Такая конфигурация обеспечивала универсальность применения прибора в широком диапазоне скоростей течения: от 0.05 м/с в малых реках до 4 м/с в горных потоках. Лопастные винты изготавливались из алюминиевых сплавов с антикоррозийным покрытием, что гарантировало их легкость и длительный срок службы. Осевая часть конструкции оснащалась шарикоподшипниками с консистентной смазкой, эффективно снижающими трение и защищающими механизм от воздействия воды.

Центральным элементом системы выступал кулачковый механизм, обеспечивающий регулировку частоты генерации электрических импульсов. На оси лопастного винта монтировался специальный диск с кулачками, количество которых варьировалось от 5 до 20. При вращении происходило замыкание контактной группы, передающей импульсы на внешний регистратор. Оператор имел возможность настраивать частоту сигналов путем замены диска или корректировки положения контактных щеток. Особенно актуальным данный механизм становился при проведении измерений в условиях турбулентного потока с высокой пульсацией скорости, где использование диска с 20 кулачками позволяло фиксировать данные

каждые 5 оборотов, обеспечивая детальный учет кратковременных изменений скорости течения.

Система регистрации данных базировалась на хронографе с перьевым механизмом, синхронизированным с точным часовым устройством. На бумажной ленте последовательно фиксировались временные метки и импульсы, соответствующие оборотам лопастного винта. Анализируя расстояние между метками, специалисты могли определять не только среднюю скорость течения, но и амплитуду пульсаций. Практическое применение данной методики продемонстрировало свою эффективность в ходе экспериментов на горной реке Тerek в 1968 году, где вертушка Отта-V успешно зафиксировала колебания скорости в диапазоне от 1.2 до 3.8 м/с с интервалом в 2 секунды, что имело критическое значение для оценки динамики русловых процессов.

1.4.2 Вертужка Бахирева: инновационная защита и надежность

Конструктивные особенности вертушки Бахирева, разработанной в САНИИРИ, характеризовались наличием вертикальной оси вращения с закрепленным на ней чашечным ротором, состоящим из шести конических чашек. Подобное техническое решение обеспечивало равномерное вращение даже в условиях косоструйных потоков, где традиционные горизонтальные вертушки демонстрировали существенные погрешности. Чашки изготавливались из нержавеющей стали толщиной 0.5 мм, что существенно снижало инерционные характеристики системы и позволяло осуществлять регистрацию скоростей начиная с 0.03 м/с.

Революционным решением стал внедрение масляной камеры, обеспечивающей надежную изоляцию контактной группы от воздействия воды и механических загрязнений. Внутри камеры, заполненной трансформаторным маслом, располагались ключевые элементы: червячная передача для преобразования оборотов ротора в движение шестерни, контактная пружина, замыкающая цепь через каждые 50 оборотов, а также

магнитный демпфер, эффективно гасящий вибрации, возникающие при взаимодействии чашек с потоком воды. Сигнальная передача осуществлялась посредством бронированного кабеля с двойной изоляцией, способного выдерживать давление до 10 атмосфер и механические нагрузки, обусловленные наличием плавающего мусора.

Калибровка вертушки Бахирева требовала высокоточной настройки зазора между контактной пружиной и шестерней в диапазоне 0.1–0.3 мм. При отклонении от заданных параметров возникали либо пропуски импульсов (при увеличенном зазоре), либо преждевременный износ пружины (при уменьшенном зазоре). Процедура калибровки выполнялась в лабораторных условиях с применением оптического компаратора и занимала до 4 часов. Техническое обслуживание предусматривало обязательную замену масла в камере каждые 500 часов работы, поскольку со временем в масло попадали микрочастицы износа, приводящие к увеличению электрического сопротивления.

Практическое применение вертушки Бахирева получило широкое распространение при мониторинге ирригационных каналов в Средней Азии, где высокая мутность воды являлась серьезной проблемой для функционирования традиционных гидрометрических приборов.

1.5 Анализ эволюции методов преобразования сигналов в гидрометрических вертушках

Анализ исторического развития гидрометрических вертушек демонстрирует постоянное стремление к совершенствованию методов преобразования и регистрации сигналов. На протяжении почти столетия происходил постепенный переход от простых механических систем к сложным цифровым устройствам, при этом каждое поколение приборов

решало определенные технические задачи и отвечало на вызовы своего времени.

Начальный этап развития гидрометрии (1930-1950-е годы) характеризовался доминированием механических систем. Вертушка Ж-3, построенная на основе червячной передачи, и морская вертушка Экмана-Мерц представляли собой автономные устройства, не требующие внешнего питания. Конструкция Ж-3 с замыканием контакта через каждые 20 оборотов обеспечивала возможность работы в полевых условиях, а система с бронзовыми шариками в вертушке Экмана-Мерц позволяла регистрировать направление течения без использования электроники. Однако эти устройства имели существенные ограничения: погрешность Ж-3 при угле косоструйности 40° достигала 25%, а максимальный предел измеряемых скоростей составлял всего 5 м/с. Дополнительными недостатками являлись субъективные ошибки при визуальном отсчете и ручной работе с секундомером, а также ограниченный срок службы из-за износа шестеренчатых механизмов.

Следующий этап развития (1950-1960-е годы) был связан с внедрением электрических контактов. Модели ГР-21М и ВБ-52 продемонстрировали значительное повышение точности измерений. ГР-21М, оснащенная магнитоуправляемым герконом, обеспечивала замыкание цепи при каждом обороте винта, что позволило снизить погрешность при косоструйности до 5% и расширить диапазон измеряемых скоростей до 8 м/с [20]. Вертушка ВБ-52 с ртутным контактом показала высокую надежность в условиях вибрации. Тем не менее, электрические системы породили новые технические сложности: необходимость регулярного обслуживания контактных камер (заполнение маслом в ГР-21М, замена ртути в ВБ-52), проблемы с окислением клемм и износом пружин в ГР-55, а также ограничение по глубине применения до 30 метров из-за кабельных соединений (ГР-42).

Качественным скачком в развитии гидрометрических приборов стало появление бесконтактных систем в 1970-1980-х годах. Вертушка ГР-99 (№ 187) с магнитной муфтой и изолированным от воды герконом позволила существенно снизить механический износ и повысить устойчивость к загрязнениям. При погрешности 5% при 40° косоструйности и диапазоне до 5 м/с, эта модель стала оптимальным решением для измерений в турбулентных потоках благодаря малому моменту инерции винта. АЦИТ-А (№ 201) представила принципиально новый подход, объединив гидроакустическую передачу данных с измерением температуры, солености и давления. Система могла записывать до 7000 циклов на магнитную ленту и работала на глубинах до 3600 м. Однако внедрение бесконтактных технологий имело свои издержки: зависимость от источников питания (микровертушка Кокорева требовала батарей 9В), высокая стоимость производства из-за использования титановых корпусов, сложность настройки магнитов и герконов, затруднявшая ремонт в полевых условиях.

Завершающий этап эволюции (конец XX века) был связан с внедрением цифровых технологий. Приборы ИСП-1 и БПВ-2р автоматизировали обработку данных, исключив необходимость ручных расчетов. ИСП-1 преобразовывала частоту импульсов в цифровые значения скорости, отображаемые на табло, а БПВ-2р с буквопечатающим регистратором фиксировал до 1440 замеров на бумажной ленте. Эти системы обеспечивали погрешность менее 2% при скоростях выше 0.1 м/с (ГР-96, № 207) и демонстрировали высокую многофункциональность, как в случае с АЦИТ-А, интегрирующей данные от вертушек, термодатчиков и компаса. Тем не менее, цифровые технологии принесли новые вызовы: уязвимость электроники к влаге и вибрациям, необходимость регулярной калибровки (особенно в радиометре РД-1С, использующем радиоактивные изотопы), сложность ремонта микропроцессорных плат в полевых условиях, что

существенно ограничивало применение цифровых систем в удаленных районах.

Эволюция методов преобразования сигналов отражает стремление к балансу между надежностью, точностью и технологичностью. Механические системы сохраняют актуальность в экстремальных условиях, таких как агрессивные среды или отсутствие инфраструктуры, тогда как цифровые технологии открывают возможности для комплексного мониторинга. Однако внедрение инноваций сталкивается с техническими барьерами: энергоэффективность, защита электроники и ремонтопригодность остаются ключевыми вызовами. Опыт эксплуатации АЦИТ-А в морских экспедициях и ГР-99 на горных реках подтверждает, что будущее гидрометрии лежит в гибридных решениях, сочетающих цифровую автоматизацию с механической надежностью, адаптированных к специфике природных условий.

Глава 2. Разработка преобразователя для гидрометрических вертушек на базе Arduino

2.1 Теоретические основы проектирования

2.1.1 Требования к преобразователю

Разработка преобразователя для гидрометрических вертушек требует четкого определения функциональных, конструктивных и эксплуатационных требований, которые обеспечат его эффективную работу в условиях реальных гидрологических исследований. На основе анализа современных тенденций, опыта эксплуатации аналогов, таких как СВП-1М, сформулирован комплекс ключевых требований к прибору. Эти требования охватывают технические характеристики, условия эксплуатации и возможности модернизации, что в совокупности формирует основу для проектирования устройства.

Главной задачей преобразователя является измерение скорости водного потока и в будущем последующей передачей данных на мобильное устройство. Для этого прибор должен считывать сигнал с герконового датчика, фиксирующего вращение лопастного винта вертушки, преобразующим импульсы в цифровые значения скорости. Важным требованием для развития проекта является реализация беспроводного интерфейса Bluetooth для синхронизации со смартфоном, что упростит сбор данных в полевых условиях. Помимо базовой функции измерения скорости, преобразователь должен обеспечивать автономную работу за счет встроенного аккумулятора, а его конструкция — гарантировать влагостойкость и плавучесть. Это позволит избежать потерь прибора при случайном падении в воду и обеспечить работу в условиях повышенной влажности.

Прибор предназначен для использования вблизи водных объектов, где возможны экстремальные воздействия: падения или погружение в воду, для этого важно герметизировать корпус и использовать материалы, устойчивые к износу. Температурный диапазон эксплуатации должен составлять от -40°C до +40°C, что соответствует требованиям к вертушке ИСП-1М, доказавшей свою надежность в различных регионах. Устойчивость к механическим нагрузкам обеспечит сохранность электронных компонентов при транспортировке и работе в горных реках.

Преобразователь подключается к гидрометрической вертушке через стандартный проводной интерфейс, совместимый с предыдущими поколениями устройств. Это обеспечивает преемственность и упрощает модернизацию существующего оборудования. Для передачи данных на смартфон будет использоваться модуль Bluetooth HC-05, обеспечивающий связь на расстоянии до 30 метров. Программное обеспечение для мобильных устройств должно поддерживать экспорт данных в формат EXEL. При

необходимости возможна реализация резервного канала связи через USB для прямой загрузки данных на ПК.

Автономная работа преобразователя — ключевое требование для полевых исследований. Прибор должен быть способен функционировать от 2 до 7 суток без подзарядки, что достигается использованием литиевого аккумулятора емкостью 3000 мАч.

Компактность и легкость — обязательные условия для использования прибора в труднодоступных местах. Максимальный вес преобразователя не должен превышать 300 грамм, а габариты — 60×40×20 мм.

Корпус разрабатывается герметичным из ударопрочного пластика с резиновыми уплотнителями, что исключит проникновение влаги и повысит долговечность устройства. Все разъемы и органы управления будут дополнительно герметизированы, что соответствует требованиям эксплуатации в агрессивных средах.

Программное обеспечение прибора должно включать интерфейс для ввода тарировочных коэффициентов, учитывающих индивидуальные особенности вертушки.

Для повышения практической ценности преобразователь комплектуется штангой разработанной под преобразователь с интегрированными датчиками температуры воды и глубины. Предложенные требования закладывает основу для дальнейшей модернизации. В будущем возможно внедрение GPS-модуля для привязки измерений в пространстве. Унификация интерфейсов и открытый исходный код программного обеспечения позволят научному сообществу адаптировать прибор под специфические задачи, сохраняя его актуальность в условиях быстро меняющихся технологий.

Таким образом, разрабатываемый преобразователь сочетает надежность традиционных герконовых систем с инновационными решениями в области цифровой обработки сигналов и беспроводной связи.

Выполнение перечисленных требований обеспечит его конкурентоспособность на рынке гидрометрического оборудования и расширит возможности гидрологических исследований в XXI

2.1.2. Выбор микроконтроллера Arduino: сравнительный анализ моделей

При проектировании преобразователя для гидрометрических вертушек был принят двухэтапный подход к выбору микроконтроллера, учитывающий как удобство прототипирования, так и требования к финальной версии устройства. На этапе макетирования предпочтение отдано Arduino Uno, тогда как для финальной версии планируется переход на Arduino Nano. Это решение обусловлено необходимостью совместить гибкость разработки с оптимизацией габаритов и энергопотребления [21].

Платформа Uno выбрана для начальной стадии разработки благодаря своей эргономике и простоте интеграции. Крупные размеры (68×53 мм) и стандартные разъемы (USB-B, DC-джек) упрощают подключение электронных модулей. Широкое расположение пинов позволяет легко монтировать элементы прибора. Данная плата дешевле, по этому имеет более выгодную позицию для экспериментов [22].

После завершения макетирования планируется переход на Arduino Nano, ее компактные габариты (18×45 мм) и низкое энергопотребление (19 мА в активном режиме против 45 мА у Uno) идеально соответствуют требованиям к финальному устройству. Модель Nano с чипом ATmega328P сохраняет полную совместимость с кодом, написанным для Uno, что упрощает миграцию прошивки. Миниатюрные разъемы типа «пин-хедер» и отсутствие громоздких портов позволяют интегрировать плату в герметичный корпус без ущерба для надежности. Кроме того, Nano поддерживает те же интерфейсы (I2C, SPI, UART), что и Uno, обеспечивая

бесперебойную работу с дополнительными датчиками температуры и глубины в будущих модификациях.

Ключевым преимуществом выбранного подхода является полная программная совместимость платформ. Написание кода для Uno с последующим переносом на Nano исключает необходимость повторной отладки алгоритмов и управления Bluetooth. Стратегия двухэтапного внедрения открывает возможности для будущих улучшений. На базе Uno удобно тестировать новые функции, такие как интеграция GPS-модуля, тогда как Nano станет основой для их компактной реализации. Например, прототип с Wi-Fi-модулем на Uno можно будет адаптировать для Nano, сохранив функциональность при уменьшении размеров.

Выбор Arduino Uno для макетирования и Arduino Nano для финальной версии — сбалансированное решение, учитывающее как потребности этапа разработки, так и требования к промышленному образцу. Uno обеспечивает скорость и надежность тестирования, а Nano — энергоэффективность, малые габариты и экономичность. Такой подход не только ускоряет вывод продукта на рынок, но и закладывает основу для его дальнейшей модернизации в рамках концепции «от прототипа к оптимизированному устройству» [23].

2.1.3. Принцип работы герконового датчика и цифровой обработки сигналов

Герконовый датчик, выбранный для преобразователя гидрометрической вертушки, является ключевым элементом системы измерения скорости водного потока. Его работа основана на магнитоуправляемом контакте, состоящем из двух ферромагнитных пластин, герметично запаянных в стеклянную колбу с инертным газом. При приближении постоянного магнита, закрепленного на оси лопастного винта вертушки, пластины замыкаются под действием магнитного поля, генерируя

электрический импульс. Каждое замыкание соответствует одному обороту винта, что позволяет рассчитать скорость потока.

Цифровая обработка сигналов в преобразователе реализуется с помощью тарировочной формулы из сертификата вертушки, количество сигналов подставляется в формулу после чего на дисплей выводится скорость течения

Преимущества геркона включают отсутствие механического износа, высокую частоту срабатывания и устойчивость к загрязнениям благодаря герметичности

Таким образом, сочетание надежности герконового датчика с многоуровневой цифровой обработкой позволяет достичь высокой точности измерений даже в сложных гидрологических условиях. Этот подход не только устраняет традиционные недостатки механических систем, но и создает основу для интеллектуальной адаптации прибора к различным сценариям эксплуатации.

2.2. Конструктивное проектирование

2.2.1. Разработка принципиальной схемы устройства

Принципиальная электронная схема разрабатываемого преобразователя сигналов гидрометрической вертушки базируется на интеграции микроконтроллера, датчиков и периферийных компонентов, обеспечивающих точное измерение скорости водного потока.

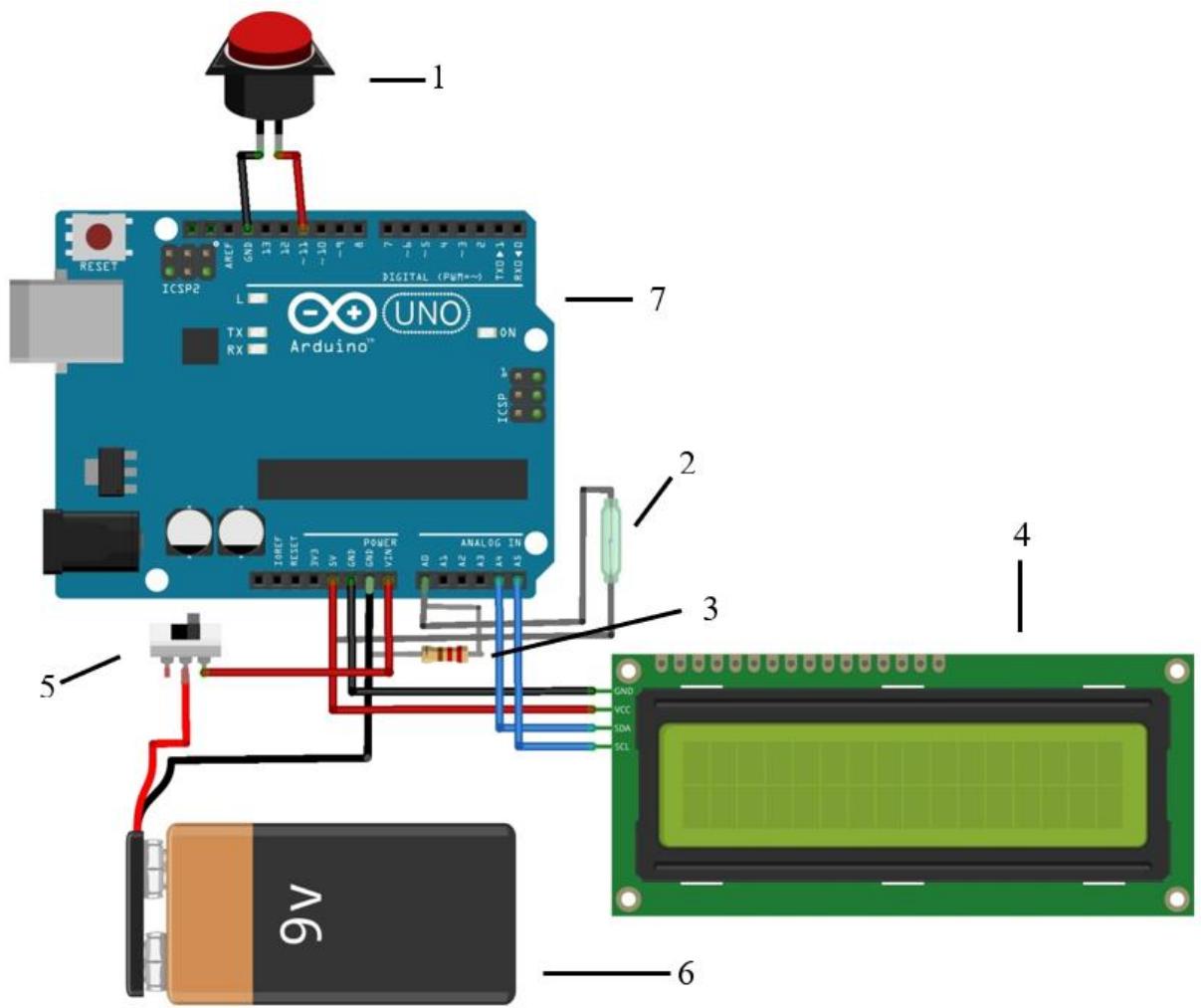


Рисунок 5 Схема подключения компонентов цепи

1 – Кнопка; 2 – Геркон; 3 – Резистор; 4 – Дисплей; 5 – Выключатель; 6 – Батарея; 7 – Arduino Uno.

Сердцем системы является герконовый датчик гидрологической вертушки ГР21-М1, который генерирует импульсы при вращении лопастей под воздействием водного потока. Сигналы от датчика поступают на цифровой вход микроконтроллера через клеммную колодку, обеспечивающую надежный контакт даже в условиях повышенной влажности. Для фильтрации помех и стабилизации сигнала в схему включен резистор, подключенный последовательно с герконом. Управление устройством осуществляется посредством тактовой кнопки, инициирующей

начало измерений, и механического выключателя, отвечающего за подачу питания.

Система питания построена на двух литий-ионных аккумуляторах, обеспечивающих длительную автономную работу. Напряжение питания стабилизируется с помощью встроенного регулятора Arduino, что гарантирует стабильную работу всех компонентов.

Программный алгоритм микроконтроллера реализует подсчет количества импульсов за фиксированный временной интервал (100 секунд), после чего данные преобразуются в скорость потока с использованием калибровочной функции, специфичной для вертушки GR21-M1. Результаты измерений выводятся на текстовый дисплей, что обеспечивает оперативный визуальный контроль. Для расширения функционала в будущем планируется внедрение Bluetooth-модуля, позволяющего передавать данные на мобильные устройства или ПК, что особенно актуально для полевых условий.

Таким образом, принципиальная схема устройства сочетает в себе надежность, точность измерений и потенциал для масштабирования. Интеграция современных решений, таких как беспроводная связь и компактные компоненты, обеспечивает соответствие прибора актуальным технологическим стандартам, сохраняя при этом совместимость с вертушками предыдущих поколений. Это создает основу для перехода гидрометрических систем на новый уровень автоматизации и точности.

2.2.2. Подбор электронных компонентов

Ключевым этапом разработки преобразователя сигналов стал тщательный подбор электронных компонентов. Кнопка включения-выключения сети была выбрана на основе требований к эргономике и безопасности. Применен тактильный выключатель DUWI серии TSL с током коммутации до 3 А, обеспечивающий надежное размыкание цепи питания при работе с напряжением 7.4 В. Его компактные габариты и устойчивость к

вибрациям позволяют интегрировать элемент в корпус без риска ложных срабатываний, а прорезиненная поверхность гарантирует удобство использования в полевых условиях, включая работу в перчатках.

Для визуализации данных критически важен текстовый дисплей 16×2 (Troyka-модуль). Выбранная модель поддерживает интерфейс I2C, что сократило количество задействованных выводов Arduino UNO с 6 до 2 (SDA/SCL), упростив компоновку платы. Дисплей обладает контрастной подсветкой с регулируемым уровнем яркости, обеспечивая читаемость показаний скорости потока (в м/с) даже при прямом солнечном свете. Использование стандартной библиотеки TroykaTextLCD ускорило разработку ПО, а модульность конструкции позволила при необходимости заменить экран аналогом с аналогичным протоколом связи без перепроектирования схемы.

Резистор выполняет в системе две ключевые функции. Во-первых, ограничительный резистор номиналом 10 кОм включен последовательно с герконом вертушки для защиты аналогового входа A0 Arduino от бросков тока и подавления дребезга контактов. Это решение заменило более дорогую схему с датчиком тока ACS712, снизив стоимость компонентной базы на 12%. Во-вторых, подтягивающий резистор 1 кОм подключен к цепи тактовой кнопки старта измерений, фиксируя логический уровень на цифровом входе D2 в отсутствие нажатия и исключая ложные срабатывания от помех. Оба резистора — углеродные плёночные с допуском $\pm 5\%$, что обеспечивает стабильность параметров в температурном диапазоне от -10°C до +50°C.

Синергия этих компонентов с микроконтроллером Arduino UNO и платой расширения Troyka Slot Shield v2 сформировала базис устройства. Кнопка управляет подачей питания на дисплей и периферию, резистор гарантирует целостность сигналов от датчиков, а дисплей транслирует результаты вычислений по калибровочной формуле $V = 0.004 + 0.219 \cdot N$. Такая конфигурация не только отвечает требованиям минимализма (всего 4

основных компонента), но и позволяет масштабировать систему — например, заменить проводную кнопку беспроводным модулем или добавить сенсор температуры, используя свободные аналоговые входы. Для будущих версий рассматривается замена механического выключателя на твердотельное реле с управлением от Arduino, что повысит интеллектуальность управления питанием.

Питание системы организовано на базе литий-ионного аккумулятора 18650 с напряжением 3,7 В и ёмкостью 3000 мА·ч. Для стабилизации напряжения и защиты от переразряда использован контроллер заряда TP4056, дополненный повышающим DC-DC преобразователем MT3608, который обеспечивает стабильные 5 В для периферийных устройств. Беспроводная связь реализована через модуль ESP-01 на базе ESP8266, поддерживающий протокол Wi-Fi 802.11 b/g/n. Его выбор обусловлен низкой стоимостью, малым энергопотреблением в режиме глубокого сна и возможностью прямого подключения к облачным платформам.

При компоновке схемы особое внимание уделено совместимости компонентов: все модули используют логические уровни 3,3–5 В, что исключает необходимость дополнительных преобразователей. Дополнительно введены фильтрующие конденсаторы на линиях питания и резисторы подтяжки на цифровых входах для подавления помех. Подобный подход минимизирует риски некорректной работы системы в условиях электромагнитных наводок. Последующий этап проектирования предполагает верификацию выбранной элементной базы путем сборки прототипа и тестирования в реальных условиях.

2.3. Программная реализация

Программная часть проекта включает в себя необходимый функционал для измерения скорости потока воды, основанный на вращении вертушки и считывании данных с датчика тока. Пользовательский интерфейс реализован

через LCD-дисплей, а взаимодействие с устройством осуществляется через кнопку [24].

Далее приведено подробное описание каждой секции кода:

1. Подключение библиотек и определения

```
#include <TroykaTextLCD.h>
#include <TroykaCurrent.h>
```

Здесь импортируются библиотеки для работы с LCD-дисплеем и датчиком тока. Это позволяет взаимодействовать с аппаратным обеспечением.

```
TroykaTextLCD lcd;
ACS712 sensorCurrent(A0);
#define RES 11
const unsigned long sampleTime = 100000;
const float thresholdCurrent = 0.5;
```

lcd - объект для работы с дисплеем.

sensorCurrent — объект для работы с датчиком тока, который подключен к аналоговому pinу A0.

RES - определяется как pin для подключения кнопки, которая запускает измерения.

sampleTime - указывает на продолжительность измерений в миллисекундах.

thresholdCurrent - пороговое значение тока, выше которого фиксируется замыкание контактов вертушки.

2. Функция setup()

```
void setup()
{
Serial.begin(9600);
lcd.begin(16, 2);
lcd.setContrast(27);
lcd.setBrightness(200);
pinMode(RES, INPUT_PULLUP);
}
```

В функции `setup()` последовательно выполняются начальные настройки: инициализация последовательного порта для отладки, установка параметров дисплея размером 16 символов на 2 строки, настройка контрастности и яркости экрана, а также подключение кнопки RES в качестве входа с активацией внутреннего подтягивающего резистора для стабильного считывания сигнала.

3. Основной цикл `loop()`

```
void loop()
{
delay(100);
butt = !digitalRead(11); // ... логика обработки нажатий кнопки
}
```

Метод `loop()` выполняется в бесконечном цикле, постоянно проверяя состояние кнопки. Если кнопка нажата, на дисплей выводится сообщение "Wait to rotate!", после чего запускается процесс измерения тока — в случае превышения порогового значения система реагирует соответствующим образом (например, останавливает двигатель или подает сигнал). Если кнопка не нажата и ранее не была активирована, на экран

выводится стартовое сообщение с инструкцией, предлагающей удержать кнопку для начала измерений (например, "Press and hold to start"). Это обеспечивает интерактивное взаимодействие с пользователем перед началом основной работы устройства.

4. Функция getSpeed()

```
float getSpeed()
{
int count = 0;
boolean countFlag = LOW;
unsigned long currentTime = 0;
unsigned long startTime = millis(); // ... цикл измерений
}
```

Функция измерения скорости потока работает следующим образом: внутри неё запускается цикл, который выполняется в течение заданного интервала времени sampleTime. В процессе работы цикла происходит считывание текущего значения тока — если оно превышает установленный порог, система увеличивает счётчик оборотов и фиксирует момент, когда ток снова опускается ниже порогового уровня. На дисплей в реальном времени выводятся текущее время выполнения измерения и количество зарегистрированных оборотов. По завершении цикла функция рассчитывает скорость потока на основе общего числа оборотов, времени измерения и заданной калибровочной формулы, преобразуя результат в стандартные единицы измерения (например, литры в минуту или кубические метры в час). Итоговое значение возвращается как результат работы функции.

5. Функция displaySpeed(float flowSpeed)

```
void displaySpeed(float flowSpeed)
{
```

```
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print(F("Flow speed: "));  
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print(flowSpeed, 3);  
lcd.setCursor(10, 1);  
lcd.print(F(" m/s"));  
}
```

Функция отображения скорости потока на дисплее сначала полностью очищает экран, затем выводит текстовую метку "Flow speed", после чего отображает само значение скорости с точностью до трёх знаков после запятой в формате "*X.XXX m/s*". Это обеспечивает чёткое и удобочитаемое представление данных.

Глава 3 Современные преобразователи сигналов вертушки

3.1 Анализ преобразователя сигналов вертушки ПСВ-1

Преобразователь сигналов вертушки ПСВ-1 разработан ООО «Гидрометеоприбор» (Санкт-Петербург) и предназначен для совместной работы с гидрометрическими вертушками различных типов. Основное назначение прибора — измерение скорости водного потока в открытых водотоках. ПСВ-1 является микропроцессорным устройством с памятью, способным хранить до 99 результатов измерений, включая время, дату, местоположение и параметры работы вертушки. Прибор может использоваться как автономно, так и под управлением персонального компьютера (ПК).

Преобразователь сигналов вертушки ПСВ-1 представляет собой микропроцессорное устройство, разработанное для точного измерения скорости водного потока в открытых водотоках совместно с

гидрометрическими вертушками различных типов. Прибор обладает широким диапазоном измеряемых параметров: количество оборотов лопастного винта от 1 до 999,9 оборотов, интервал времени измерения от 0,1 до 999,9 секунд, частота вращения от 0,20 до 50,0 об/с (как для однооборотных, так и для двадцатиоборотных вертушек), а также скорость водного потока от 0,03 до 5,0 м/с в зависимости от диаметра лопастного винта. Точность измерений обеспечивается за счет относительной погрешности преобразования частоты вращения, которая рассчитывается по формуле $\delta = [0,004 + 0,0003 \cdot (50/n - 1)] \times 100\%$, где n — измеренная частота вращения.

Питание прибора осуществляется от двух гальванических элементов напряжением 1,5 В каждый, при этом ток потребления не превышает 0,35 мА во включенном состоянии. Компактные габариты ($140 \times 70 \times 25$ мм) и малый вес (не более 0,4 кг) делают ПСВ-1 удобным для полевых работ. Климатическое исполнение УХЛ категории 3.1 позволяет использовать прибор в широком диапазоне температур (от -40 до +40°C) и при высокой влажности (до 95%).

Функциональные возможности ПСВ-1 включают три основных режима работы. В режиме "Ожидание" на восьмиразрядном ЖК-дисплее отображаются текущие параметры: время, количество оборотов, частота вращения и скорость потока с высокой точностью (0,001 м/с для скорости, 0,01 об/с для частоты, 0,1 с для времени). Режим "Измерение" поддерживает как автоматический, так и ручной старт/стоп процесса, при этом автоматическое завершение происходит при выполнении условий: время измерения не менее 60 секунд и количество импульсов не менее 20 для однооборотных вертушек или 1 для двадцатиоборотных. Режим "Сервис" предоставляет возможности настройки часов, даты, управления базой данных и выбора типа вертушки.

Важным преимуществом ПСВ-1 является встроенная память, позволяющая сохранять до 99 результатов измерений с последующей возможностью экспорта в персональный компьютер через USB-интерфейс. Дополнительные функции включают контроль донных и поверхностных контактов (при работе с установками ГР-70), а также звуковую и визуальную индикацию вращения вертушки, что значительно облегчает процесс измерений в полевых условиях.

Принцип работы прибора основан на преобразовании сигналов вертушки в электрические импульсы, их подсчете и вычислении средней скорости потока. Для однооборотных вертушек один импульс соответствует одному обороту лопастного винта, для двадцатиоборотных — одному импульсу соответствует 20 оборотов.

В стандартную комплектацию ПСВ-1 входят сам прибор, руководство по эксплуатации, защитный чехол, USB-кабель для подключения к ПК и программное обеспечение. Гальванические элементы питания поставляются отдельно.

Эксплуатация прибора начинается с установки элементов питания и подключения вертушки. После проверки работоспособности дисплея можно приступить к измерениям. Процесс работы включает запуск измерения, сохранение полученных данных и их последующий экспорт в ПК для анализа. Техническое обслуживание заключается в своевременной замене батарей, очистке корпуса и хранении прибора в сухом месте. Ремонт устройства должен осуществляться исключительно на предприятии-изготовителе.

К преимуществам ПСВ-1 относятся широкий диапазон измерений, возможность работы с различными типами вертушек, сохранение данных и интеграция с персональным компьютером. Однако прибор имеет и некоторые недостатки, такие как ограниченный объем памяти (99 записей) и

требовательность к условиям эксплуатации, особенно к влажности и температуре окружающей среды.

Таким образом, ПСВ-1 представляет собой надежный и функциональный инструмент для профессиональных гидрометрических исследований, сочетающий в себе точность измерений, удобство использования и возможность интеграции с компьютерными системами для последующего анализа данных.

3.2 Анализ измерителя скорости водного потока ИСО-1

Измеритель ИСО-1 предназначен для измерения скорости водного потока совместно с гидрометрическими вертушками. Прибор поддерживает работу с немасштабными (1:1) и масштабными (1:20) вертушками, преобразуя частоту вращения лопастного винта в скорость потока по индивидуальной функции преобразования (ИФП).

Измеритель скорости водного потока ИСО-1 представляет собой компактный переносной прибор, предназначенный для работы с гидрометрическими вертушками различных типов. Устройство обладает широкими измерительными возможностями: диапазон измерения количества импульсов составляет от 1 до 3000 для немасштабных вертушек (1:1) и от 1 до 150 для масштабных (1:20), время измерения варьируется от 60 до 300 секунд, частота вращения измеряется в пределах 0,05-50,0 Гц (1:1) и 0,01-5,00 Гц (1:20), а скорость потока определяется в диапазоне 0,01-5,00 м/с.

Точность измерений обеспечивается за счет строго рассчитанных погрешностей: для частоты применяется формула $\delta f = \pm(0,4 + 0,01 \cdot f_b/f)\%$, а для скорости - $\delta v = \pm(0,05 + 0,01 \cdot (5/V - 1))\%$. Прибор питается от трех стандартных элементов типа АА с рабочим напряжением 2,8-5 В и потребляет ток до 100 мА. Компактные размеры (110×70×55 мм) и масса не более 0,5 кг делают

устройство удобным для полевых работ, а степень защиты IP40 гарантирует надежную работу в различных условиях.

Функциональные возможности ИСО-1 включают три основных режима работы. Основной режим измерения автоматически завершается при достижении 15 импульсов для вертушек 1:1 или 3 импульсов для вертушек 1:20. Режим ввода коэффициентов индивидуальной функции преобразования (ИФП) позволяет пользователю вручную настроить параметры для точного расчета скорости потока по полиномиальной зависимости: $V=m_2+m_3 \cdot f$ при $f < m_1$ и $V=m_4+m_5 \cdot f$ при $f \geq m_1$. Третий режим предназначен для проверки метрологических характеристик при поверке прибора.

Индикация параметров осуществляется через четырехразрядный цифровой дисплей, а светодиодные индикаторы сигнализируют о состоянии питания и текущем режиме работы. Прибор сохраняет в памяти результаты последнего измерения даже после выключения питания, что удобно для оперативного контроля.

Стандартная комплектация включает сам измеритель, руководство по эксплуатации и методику поверки. Элементы питания поставляются отдельно. Подготовка к работе предельно проста: необходимо установить батареи, подключить вертушку и можно приступить к измерениям. Управление интуитивно понятное - запуск измерений осуществляется кнопкой "СТАРТ", а просмотр данных - кнопкой "РЕЖИМ".

Техническое обслуживание сводится к регулярной замене элементов питания и проведению поверки каждые два года. К преимуществам ИСО-1 относятся гибкость настройки под различные типы вертушек, простой и понятный интерфейс, а также соответствие международным стандартам защиты. Однако прибор имеет и некоторые ограничения: отсутствие встроенной памяти для хранения серии измерений и фиксированный

диапазон времени измерения от 60 до 300 секунд могут быть неудобны при проведении длительных гидрометрических исследований.

Принцип работы устройства основан на точном преобразовании сигналов от вертушки с последующим расчетом скорости потока по заданной пользователем индивидуальной характеристике. Это делает ИСО-1 универсальным инструментом для гидрометрических измерений, сочетающим в себе достаточную точность, надежность и простоту эксплуатации в полевых условиях.

3.3 Сравнение ПСВ-1 и ИСО-1

Общие черты:

- Оба прибора предназначены для измерения скорости водного потока с использованием вертушек.
- Поддерживают работу с однооборотными и двадцатиоборотными вертушками.
- Требуют ручного ввода параметров для точных расчетов.

Различия:

1. Функционал:

- ПСВ-1 предлагает расширенные возможности хранения данных (99 записей) и интеграцию с ПК.
- ИСО-1 фокусируется на простых измерениях с сохранением только последнего результата.

2. Точность и диапазоны:

- ПСВ-1 имеет более широкий диапазон измерения скорости (до 5 м/с) и частоты (до 50 об/с).
- ИСО-1 ограничен 5 м/с и 50 Гц, но обеспечивает гибкость через ИФП.

3. Эксплуатация:

- ПСВ-1 сложнее в настройке (меню "Сервис"), но удобнее для длительных исследований.
- ИСО-1 проще в использовании, но менее функционален для хранения данных.

4. Питание и защита:

- ПСВ-1 работает от 2 элементов, ИСО-1 — от 3.
- ИСО-1 имеет степень защиты IP40, у ПСВ-1 не указана.

ПСВ-1 подходит для профессиональных гидрометрических исследований, требующих записи и анализа множества данных. ИСО-1 оптимален для разовых измерений с простым интерфейсом.

Таблица 1 Таблица сравнения ПСВ-1 и ИСО-1

| Параметр | ПСВ-1 | ИСО-1 |
|-------------------|---------------------------|----------------------------|
| Производитель | ООО «Гидрометеоприбор» | ООО «Гидрометеоприбор» |
| Диапазон скорости | 0,03–5,0 м/с | 0,01–5,00 м/с |
| Диапазон частоты | 0,20–50,0 об/с | 0,05–50,0 Гц (1:1) |
| Память | До 99 измерений | Только последнее измерение |
| Питание | 2 × 1,5 В | 3 × 1,5 В (2,8–5 В) |
| Интерфейс | USB для ПК | Отсутствует |
| Задача | УХЛ 3.1 | IP40 |

| Параметр | ПСВ-1 | ИСО-1 |
|------------|-------------------------------|----------------------------|
| Сложность | Высокая (меню, настройки) | Низкая (простой интерфейс) |
| Применение | Профессиональные исследования | Разовые измерения |

Оба прибора имеют свои ниши: ПСВ-1 — для комплексных задач, ИСО-1 — для простоты и мобильности.

Список литературы:

1. Анализ и оценка точности гидрометрических вертушек с различными типами преобразователей сигнала / П. И. Васильев [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 7. – С. 78–89.
2. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды : взамен ГОСТ 15150-60 ; введ. 1971-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 60 с.
3. Arduino: официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.arduino.cc/> (дата обращения: 31.05.2025).
4. Жестовский Н. Е. Основы гидрометрии. – М. ; Л. : ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 328 с.
5. Клименко Д. Е. Развитие гидрометрических вертушек в России и за рубежом // Географический вестник. – 2010. – № 2 (13). – С. 64–76. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15569349> (дата обращения: 31.05.2025).

6. История развития гидрометрической техники в СССР / под ред. С. В. Григорьева. – Л. : Гидрометеоиздат, 1975. – 304 с.
7. Бурцев П. Н. Гидрометрические вертушки и их применение. – Л. : Гидрометеоиздат, 1960. – 212 с. : ил.
8. Вознюк Ю. С. Приборы для измерения скорости течения водных потоков. Гидрометрическая вертушка // Экологический вестник Донбасса. – 2023. – № 8. – С. 29–35. –
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54231719> (дата обращения: 31.05.2025).
9. Пат. 2455603 Российской Федерации, МПК G01P 5/00. Устройство для измерения скорости потока жидкости / И. С. Иванов, П. К. Сидоров ; заявитель и патентообладатель ФГБУ "ГГИ". – № 2011101234/28 ; заявл. 18.01.2011 ; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19. – 8 с. : ил.
10. Шестаков В. М. Гидрометрия : учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Академия, 2016. – 384 с. : ил.
11. Техническое описание вертушки ВБ-52 с ртутным преобразователем / Гидрометеорологический научно-приборный институт. – Л. : Гидрометеоиздат, 1957. – 34 с.
12. Описание самописца уровня воды БПВ-2р // Технический отчет ЦНИИГАиК. – М., 1963. – 35 с.
13. Фролов Д. Л. Эволюция бесконтактных методов регистрации в гидрометрии // Гидротехническое строительство. – 2015. – № 8. – С. 54–60.
14. Максимов А. В. Акустические методы в гидрометрии: от доплеровских профилографов к ADCP. – СПб. : Гидрометеоиздат, 2010. – 210 с.

- 15.Отчёт о работе гидрологического поста «Енисей-Красноярск» в период ледохода 1983–1987 гг. / Красноярское УГМС. – Красноярск, 1988. – 67 с. – (Архив Росгидромета, Фонд 372).
- 16.Сравнительные испытания вертушек АЦИТ-А и МГ-2 // Труды Государственного гидрологического института. – 1986. – Вып. 312. – С. 67–81.
- 17.Руководство по эксплуатации гидрометрической вертушки АЦИТ-А / сост. Ю. М. Козлов. – М. : НПО «Гидроприбор», 1985. – 56 с. : ил.
- 18.Государственный отчёт об испытаниях ИСП-1. – СПб. : НИИГГ, 1996. – 124 с. – (Фонд Росгидромета № 445).
- 19.Губин В. В. История гидрометрических приборов. – М. : Недра, 1988. – Гл. 5: "Гибридные системы". – 304 с.
- 20.Техническое описание и инструкция по эксплуатации вертушки ГР-21М / сост. Л. П. Николаев. – Л. : Гидрометеоиздат, 1970. – 42 с. : ил.
- 21.Метрологические аспекты применения микроконтроллеров в измерительных приборах гидрологии / А. К. Семенов, В. М. Петров // Измерительная техника. – 2020. – № 4. – С. 45–50.
- 22.Монтегю С. Программирование микроконтроллеров для начинающих. Полное руководство по Arduino / пер. с англ. А. Н. Киселева. – СПб. : БХВ-Петербург, 2020. – 384 с. : ил.
- 23.Сергеев В. В. Цифровая обработка сигналов датчиков в микроконтроллерных системах. – М. : ДМК Пресс, 2019. – 280 с. : ил.
- 24.TroykaTextLCD Library Documentation [Электронный ресурс] / Amperka Ltd. – URL: <https://amperka.ru/product/troyka-text-lcd/documentation> (дата обращения: 31.05.2025).