Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

На правах рукописи



Смагулов Султанбек Берикулы

ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНЫХ ВОДОРОДНЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ШКАЛ АТОМНОГО ВРЕМЕНИ

2.2.4. «Приборы и методы измерения (по видам измерений)»
Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Юрченко Алексей Васильевич

Томск – 2026

Оглавление

Введение 5
Глава 1. Экспериментальное исследование характеристик пассивных водородных стандартов частоты 15
1.1 Состав и структура эталонного комплекса ГЭВЧ РК 15
1.1.1 Пассивный водородный стандарт частоты VCH-1008 18
1.1.2 Система сравнения времени по ГНСС 19
1.1.3 Публикации BIPM (Circular T и Rapid UTC) 22
1.1.4 Система формирования и управления выходными сигналами 23
1.1.5 Компаратор фазовый многоканальный VCH-315M 24
1.1.6 Климатическая камера VCH-A18 25
1.2 Характеристики нестабильности частоты 25
1.2.1 Девиация Аллана 25
1.2.2 Модифицированная и параболическая девиации 26
1.2.3 Стохастические модели шумов 26
1.3 Дрейф частоты пассивных водородных стандартов 27
1.3.1 Физические механизмы дрейфа 27
1.3.2 Методика оценки дрейфа 27
1.3.3 Экспериментальные результаты 28
1.3.4 Компенсация дрейфа 28
1.3.5 Динамика дрейфа 29
1.4 Долговременная нестабильность частоты 31
1.4.1 Девиация Аллана экспериментальная 31
1.4.2 Идентификация типов шумов 32
1.5 Температурный коэффициент частоты 33
1.5.1 Методика измерения ТКЧ 33
1.5.2 Экспериментальные результаты 34
1.5.3 Программная термокомпенсация 35
1.6 Бюджет неопределённости 37
1.6.1 Источники неопределённости 37
1.6.2 Верификация бюджета неопределённости 38
1.7 Выводы по Главе 1 38
Глава 2. Разработка алгоритма автоматической подстройки национальной шкалы времени 40
2.1 Постановка задачи управления 40
2.2 Математическая модель системы управления 41
2.2.1 Стохастическая модель шумов и связь с параметрами Главы 1 42
2.3 Теория линейно-квадратичного гауссовского управления атомными часами 43
2.3.1 Линейно-квадратичный регулятор 44
2.3.2 Постоянная времени контура управления 45
2.3.3 Фильтр Калмана для оценки фазы и частоты 46
2.3.4 Минимизация функционала 47
2.3.5 Статические ошибки в установившемся режиме 48
2.4 Метод определения оптимальной постоянной времени 48

2.4.1 Связь интервала усреднения с частотными характеристиками 49
2.4.2 Критерий качества нестабильности частоты 50
2.4.3 Экспериментальное определение интервала усреднения для UTC(KZ) 50
2.5 Расчёт параметров системы управления 51
2.6 Алгоритм оценки фазы и частоты без фильтра Калмана 53
2.6.1 Мотивация и описание метода 53
2.6.2 Компенсация предыдущего управляющего воздействия 53
2.6.3 Линейная аппроксимация и экстраполяция 54
2.7 Численное моделирование процесса управления 54
2.7.1 Модель и параметры 54
2.7.2 Сравнение результатов моделирования нестабильности частоты 55
2.7.3 Результаты моделирования 56
2.8 Экспериментальные результаты работы системы 57
2.8.1 История управления и начальный период 57
2.8.2 Анализ за двухлетний период (май 2022 – июнь 2024) 59
2.9 Методы компенсации систематических погрешностей 60
2.9.1 Компенсация дрейфа частоты 60
2.9.2 Температурная компенсация стандарта PHM 3 61
2.9.3 Фильтрация выбросов в данных UTCr 61
2.9.4 Экстраполяция с компенсацией задержки UTCr 61
2.10 Сравнение методов управления шкалой атомного времени 62
2.10.1 Сравнение с алгоритмом Мишагина–Медведева (2021) 62
2.10.2 Сравнение трёх стратегий расчёта коэффициентов 64
2.10.3 Применимость пассивных водородных стандартов 64
2.11 Выводы по Главе 2 65
Глава 3. Анализ неопределённости прогноза шкал времени 67
3.1 Актуальность задачи прогнозирования шкал времени 67
3.2 Математическая модель и модель прогнозирования 67
3.2.1 Стохастическая модель динамики фазы атомных часов 67
3.2.2 Линейная модель прогнозирования 68
3.3 Теоретическая оценка неопределённости прогноза 69
3.3.1 Формула неопределённости на основе стохастической модели 69
3.3.2 Упрощённая оценка неопределённости прогноза 70
3.4 Оценка параметров стохастической модели 72
3.5 Экспериментальная проверка ошибки прогноза 73
3.5.1 Методика расчёта экспериментальной ошибки 73
3.5.2 Результаты сравнения теоретических и экспериментальных оценок 74
3.6 Поиск оптимального интервала оценивания 75
3.6.1 Постановка задачи оптимизации 75
3.6.2 Результаты численного моделирования 76
3.6.3 Практические рекомендации 77
3.7 ГНСС-приёмники эталонного комплекса и калибровка 78
3.7.1 Основной приёмник GTR55 (KZ04) 78
3.7.2 Резервный приёмник TTS-4 (KZ03) 80

3.8 Оценка качества ГНСС-сличений....81
3.8.1 Результаты CV-сличений с эталонными приёмниками....81
3.8.2 Анализ качества P3- и PPP-линков....82
3.8.3 Текущее состояние UTC(KZ) и оценка BIPM....84
3.9 Выводы по Главе 3....85
Глава 4. Экспериментальная реализация и результаты применения алгоритма управления....86
4.1 Внедрение алгоритма в ГЭВЧ РК....86
4.1.1 Программно-аппаратная реализация....86
4.1.2 Этапы внедрения и отладки....90
4.1.3 Система мониторинга и web-интерфейс....91
4.2 Анализ экспериментальных результатов....93
4.2.1 Общая характеристика экспериментальных данных....93
4.2.2 Точность синхронизации с UTC....94
4.2.3 Сравнение с данными Rapid UTC....97
4.2.4 Нестабильность частоты UTC(KZ)....99
4.3 Сравнение с другими национальными шкалами времени....103
4.3.1 Методология сравнения....103
4.3.2 Сравнение погрешности синхронизации с UTC....103
4.3.3 Сравнение нестабильности частоты....106
4.3.4 Динамика улучшения UTC(KZ)....107
4.3.5 Весовые коэффициенты часов KZ в формировании TAI....110
4.3.6 Сравнение экономической эффективности....113
4.3.7 Международное признание....113
4.4 Анализ специальных режимов работы и нештатных ситуаций....115
4.4.1 Классификация нештатных ситуаций....115
4.4.2 Детальный анализ эпизода автономной работы (август 2023)....115
4.4.3 Статистика надёжности системы....116
4.4.4 Эпизод обнуления весовых коэффициентов BIPM (февраль 2025)....117
4.4.5 Официальная оценка BIPM (март 2026)....118
4.4.6 Государственная регистрация программного обеспечения....118
4.5 Выводы по Главе 4....118
Заключение....120
Используемые термины и обозначения....122
Перечень сокращений и условных обозначений....128
Литература....131
Приложения....141
Приложение А. Акты о внедрении результатов диссертационной работы....141
Приложение Б. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ....145
Приложение В. Сводная таблица параметров алгоритма управления....147
Приложение Г. Формат данных BIPM для формирования шкал UTC(k)....149
Приложение Д. Пример протокола цикла управления UTC(KZ)....152

Введение

Актуальность работы

С развитием современных технологий, включая мобильные сети пятого и шестого поколений (5G/6G), интернет вещей (IoT), умные города и автономные транспортные системы, а также глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), точная временная синхронизация становится основополагающим фактором для их эффективного функционирования. Согласно определению Международного бюро мер и весов (BIPM – Bureau International des Poids et Mesures) [1], секунда – единица времени Международной системы единиц (СИ) – определяется через частоту сверхтонкого перехода атома цезия-133 [2], что обеспечивает наивысшую точность её воспроизведения среди всех основных единиц измерения.

Всемирное координированное время (UTC) формируется BIPM на основе данных национальных метрологических институтов и их атомных часов [3, 4]. Национальные реализации UTC, обозначаемые как UTC(k), используются как прослеживаемые опорные шкалы времени и регулярно сравниваются с UTC в рамках международных процедур BIPM [5].

Современные телекоммуникационные, энергетические и финансовые системы предъявляют жёсткие требования к временной синхронизации [6–9]. В зависимости от приложения допустимые ошибки лежат от наносекундного до микросекундного диапазона. Эти требования обусловливают необходимость устойчивых национальных источников времени, прослеживаемых к UTC и способных сохранять характеристики при нарушениях внешних каналов синхронизации.

Для формирования высокостабильных национальных шкал времени традиционно используются активные водородные стандарты частоты (мазеры) [10, 11] и цезиевые реперы фонтанного типа [12, 13]. Они обеспечивают высокие метрологические характеристики, но отличаются значительной стоимостью и эксплуатационной сложностью. Поэтому для метрологических институтов с ограниченным бюджетом актуален поиск более доступной элементной базы при сохранении требуемого качества национальной шкалы.

На этом фоне возрастающий интерес вызывают пассивные водородные стандарты частоты (ПВСЧ) [14, 15], которые представляют собой экономически доступную альтернативу при меньших габаритах и энергопотреблении. Стоимость ПВСЧ в 5–8 раз ниже стоимости активных водородных мазеров. По метрологическим характеристикам ПВСЧ уступают активным стандартам, но при этом обеспечивают хорошее соотношение нестабильность/стоимость для задач формирования национальных шкал времени [11, 14]. Традиционно ПВСЧ применяют на

рабочих эталонах (станции слежения ГНСС, системы связи), но не для формирования национальных шкал атомного времени.

В последние годы надёжность сигналов ГНСС, которые часто используются для синхронизации времени, существенно снизилась из-за воздействия промышленных шумов, преднамеренных атак (подавление или подмена сигналов) и ограничений, вызванных плотной застройкой. Эти проблемы создают риски для работы сетей связи и других критически важных систем, что повышает значимость собственных национальных шкал времени.

Применению ПВСЧ в национальных эталонах времени способствует быстрая реализация UTC – Rapid UTC (UTCr), официально публикуемая BIPM еженедельно с июля 2013 года [16]. Данные становятся доступными с задержкой несколько суток. Недельный интервал соответствует диапазону высокой долговременной стабильности ПВСЧ при компенсации дрейфа частоты и позволяет использовать UTCr как оперативную опорную информацию для автоматической подстройки национальной шкалы времени.

Данная работа направлена на разработку системы автоподстройки шкалы времени, которая обеспечит эффективное использование пассивных водородных стандартов в национальных системах времени и частоты. Исследование поведения этих стандартов на длительных интервалах времени и разработка методов синхронизации с международной шкалой UTC позволят улучшить метрологическую инфраструктуру и создать основу для интеграции стран с ограниченными финансовыми возможностями в глобальные системы стандартизации времени.

Степень разработанности темы

Теоретические основы описания нестабильности стандартов частоты заложены в работах D. W. Allan [17] и развиты в стандарте IEEE 1139-2022 [18]. Методы сравнения времени по ГНСС разработаны специалистами BIPM [19, 20]: от метода общего обзора (Common View) [21, 22] до метода точного позиционирования (Precise Point Positioning, PPP) [23, 24].

Алгоритмы управления национальными шкалами времени развиваются с конца 1980-х годов. Известны подходы на основе фильтра Калмана с применением пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора [25–33]. Данными вопросами занимались Koppang P., Leland R., Lewandowski W., Matsakis D., Panfilo G., Tavella P., Arias A., Petit G., Defraigne P., Galleani L. и др.

В России формированием и хранением национальной шкалы времени UTC(SU) занимается ВНИИФТРИ [34], где разработаны методы управления шкалой времени на основе активных водородных стандартов частоты. Существенный вклад в развитие алгоритмов формирования шкал времени UTC(SU) внесли Пушкин С. Б., Донченко С. И., Блинов И. Ю., Норец И. Б., Смирнов Ю. Ф., Подогова С. Д., Мишагин К. Г. и др.

В Казахстане Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ РК) был впервые создан в 2000 году в городе Алматы и утверждён Госстандартом в 2001 году. В 2005 году была учреждена Государственная служба времени и частоты Республики Казахстан. В 2006–2007 годах в городе Астане был введён в эксплуатацию новый эталонный комплекс на базе промышленных цезиевых стандартов частоты Symmetricom 5071A, утверждённый в качестве государственного первичного эталона. С 2008 года ГЭВЧ РК на постоянной основе участвует в международных ключевых сличениях CCTF-K001.UTC «Calculation of the reference time scale UTC». Создание и развитие эталона в период с 2001 по 2018 год осуществлялось при непосредственном участии учёных-хранителей Елюбаева Б. Ш., Филько И. А. и Конканова М. Д. [35]. С 2018 года хранителем ГЭВЧ РК является автор настоящей диссертации. В 2021 году эталон был оснащён новым эталонным комплексом на базе пассивных водородных стандартов частоты VCH-1008 производства АО «Время-Ч», что обусловило необходимость разработки соответствующих алгоритмов управления национальной шкалой времени Республики Казахстан UTC(KZ).

Требования к национальным шкалам времени установлены в рекомендациях международных организаций [5–7]. Характеристики пассивных водородных стандартов частоты исследованы применительно к стандартам Ч1-76 [36] и VCH-1008 [37] российского производства, а также к бортовым ПВСЧ для ГНСС [38]. Однако систематических исследований применимости ПВСЧ в качестве основы национальных шкал времени, а также анализа характеристик ПВСЧ на длительных интервалах наблюдения (более года) в опубликованной литературе не представлено.

Работы по использованию Rapid UTC для управления шкалами времени ограничены публикациями G. Petit [39], посвящёнными характеристикам самой системы UTCr; детальные алгоритмы управления в открытом доступе не опубликованы. Среди частичных аналогов следует выделить два случая. Первый – UTC(TL) (Тайвань), реализованная преимущественно на базе коммерческих цезиевых часов с одним ПВСЧ, однако сведения об алгоритме управления в литературе отсутствуют [3]. Второй – UTC(IMBH) (Босния и Герцеговина), где применяется автоподстройка цезиевых стандартов, но привязка осуществляется к шкале времени UTC(PTB) (Германия), а не непосредственно к UTC по данным UTCr [40]. Сама шкала UTC(PTB) формируется на основе цезиевого фонтана с использованием алгоритма подстройки, описанного в [41], однако данный подход неприменим к ПВСЧ ввиду принципиального различия шумовых характеристик.

Ни один из известных аналогов не решает задачу управления национальной шкалой времени на базе пассивных водородных стандартов с использованием еженедельных данных

UTCr, что определяет научную проблему настоящего исследования: отсутствие теоретически обоснованных и экспериментально проверенных алгоритмов управления такими шкалами.

Для Республики Казахстан развитие национальной метрологической инфраструктуры времени и частоты является частью стратегических приоритетов, определённых Государственной программой «Цифровой Казахстан» и Законом РК «Об обеспечении единства измерений». Участие Казахстана в формировании Международного атомного времени (TAI) посредством регулярных публикаций в Circular T является обязательным условием международного признания результатов измерений. Кроме того, точное национальное время необходимо для функционирования систем электроэнергетики, телекоммуникаций 5G, цифровых финансовых сервисов и навигационных технологий.

Цель и задачи исследования

Цель работы: разработка и экспериментальное обоснование методики формирования национальной шкалы времени UTC(KZ) на основе пассивных водородных стандартов частоты с обеспечением погрешности синхронизации с UTC на уровне менее 10 нс при минимизации экономических затрат.

Объект исследования: системы формирования и поддержания национальных шкал времени на базе пассивных водородных стандартов частоты.

Предмет исследования: долговременные характеристики ПВСЧ, алгоритмы автоматической подстройки шкалы времени по данным UTCr, методы компенсации систематических погрешностей.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи**:

1. Комплексный анализ долговременных метрологических характеристик пассивных водородных стандартов VCH-1008 на интервале более 3 лет непрерывной эксплуатации, включая оценку и компенсацию дрейфа частоты, анализ долговременной нестабильности и исследование температурной чувствительности (Глава 1).

2. Разработка математически обоснованного алгоритма автоматической подстройки национальной шкалы времени с использованием еженедельных данных UTCr, включая выбор структуры регулятора, методику определения оптимальных параметров и учёт задержки данных UTCr (Глава 2, разделы 2.1–2.7).

3. Численное моделирование разработанного алгоритма для проверки и оптимизации его параметров (Глава 2, разделы 2.7).

4. Анализ неопределённости прогноза шкал времени пассивных водородных стандартов и определение оптимального интервала оценивания (Глава 3).

5. Реализация алгоритма автоматической подстройки на ГЭВЧ РК, экспериментальное подтверждение достижения погрешности синхронизации UTC(KZ) с UTC на уровне менее 10 нс на основе данных за 47 месяцев непрерывной эксплуатации (июнь 2022 – апрель 2026) и сравнительный анализ характеристик UTC(KZ) с национальными шкалами времени других стран (Глава 4).

Решение поставленных задач базируется на методах статистического анализа нестабильности атомных часов [10, 11, 17, 18], теории автоматического управления [31–33], численного моделирования стохастических процессов и метрологии времени и частоты [42].

Научная новизна

1. Экспериментально обоснована возможность формирования национальной шкалы атомного времени исключительно на основе пассивных водородных стандартов частоты и установлены их долговременные характеристики, значимые для задач ведения UTC(k).

2. Разработан и обоснован алгоритм автоматической подстройки национальной шкалы времени на основе ПИ-регулятора с использованием еженедельных данных Rapid UTC, учитывающий задержку публикации опорных данных и предыдущее управляющее воздействие.

3. Установлена область робастности параметров управления шкалой времени и обоснован критерий выбора постоянной времени контура по соотношению нестабильности свободного генератора и опорного сигнала UTCr.

4. Предложена упрощённая оценка неопределённости прогноза шкалы времени ПВСЧ на основе статистических функций нестабильности, не требующая идентификации параметров стохастической модели.

Теоретическая значимость

1. Получены данные о долговременной нестабильности частоты и дрейфах частоты пассивных водородных стандартов относительно UTC.

2. Разработаны методы оптимизации алгоритмов управления квантовыми эталонами времени на основе критериев долговременной нестабильности. Обоснован выбор ПИ-регулятора с критическим демпфированием, обеспечивающего качество управления, близкое к оптимальному линейно-квадратичному гауссовскому (ЛКГ) управлению, при существенно меньшей вычислительной сложности.

3. Верифицированы стохастические модели флуктуаций частоты пассивных водородных стандартов частоты на длительных интервалах наблюдения (более 3 лет). Расхождение модели и эксперимента составляет 6–8 % по нестабильности частоты и не более 27 % по СКО ошибки синхронизации.

4. Предложена упрощённая оценка неопределённости прогноза шкалы времени на основе девиации Аллана, не требующая идентификации параметров стохастической модели. Показано, что неопределённость прогноза на 7 суток составляет 2,5–2,8 нс, что обеспечивает автономную работу шкалы до 3 недель с сохранением отклонения менее 10 нс.

5. Установлены количественные соотношения между параметрами алгоритма управления и достигаемой точностью синхронизации: выявлена область оптимальных значений постоянной времени T = 8–12 суток, в которой вариация СКО ошибки синхронизации не превышает 15 %.

Практическая значимость

1. Внедрение алгоритма в ГЭВЧ РК обеспечило устойчивое ведение UTC(KZ) и регулярное участие Казахстана в публикациях BIPM Circular T. По расширенным данным Circular T СКО отклонения UTC(KZ) от UTC составляет около 2,4 нс при максимальном абсолютном отклонении 8,9 нс.

2. Методика применима для национальных метрологических институтов с ограниченным бюджетом, позволяя обеспечить точность синхронизации, требуемую современными телекоммуникационными системами. Достигнутое снижение капитальных затрат по сравнению с решениями на базе активных водородных мазеров (сравнительный анализ стоимости приведён в таблице 1.1) открывает возможности для расширения глобальной системы стандартизации времени за счёт вовлечения стран с ограниченными ресурсами.

3. Результаты работы демонстрируют, что пассивные водородные стандарты способны обеспечивать формирование шкал времени с метрологическими характеристиками, соответствующими требованиям BIPM, что имеет значительный потенциал для применения в телекоммуникациях, навигационных технологиях, энергетических сетях и системах IoT.

Методология и методы исследования

В работе использованы методы статистической радиофизики для анализа нестабильности частоты (девиация Аллана, модифицированная девиация Аллана, параболическая девиация) [10, 11, 17, 18], теория автоматического управления (ПИ-регуляторы, фильтр Калмана) [30–33], численное моделирование стохастических процессов, методы вероятностной статистики, а также методы сравнения времени по ГНСС [19–24].

Теоретические исследования основаны на применении теории автоматического регулирования для разработки алгоритма управления и методов математической статистики для обработки экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием трёх пассивных водородных стандартов частоты и времени VCH-1008, формирователя эталонных частот резервируемого VCH-317, компаратора фазового многоканального VCH-315M, ГНСС-

приёмника GTR55, термогигрометра ИВТМ-7М и специализированного программного обеспечения из состава ГЭВЧ РК.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Пассивные водородные стандарты VCH-1008 на интервале наблюдений более 3 лет обеспечивают нестабильность частоты σy(1 сут) = (1,3–1,8)×10^{-15} при линейном дрейфе (2,1–3,9)×10^{-16}/сут; программная компенсация снижает дрейф до уровня порядка 10^{-17}/сут, экспериментально определённый температурный коэффициент частоты составляет (3,72 ± 0,08)×10^{-15}/°C, а программная термокомпенсация подавляет температурное влияние более чем на 90 %.

2. Алгоритм автоматической подстройки UTC(KZ) на основе ПИ-регулятора с постоянной времени T = 10 суток и еженедельных данных Rapid UTC обеспечивает по расширенному массиву Circular T СКО отклонения порядка 2,4 нс и максимальное абсолютное отклонение 8,9 нс; качество управления составляет около 94 % относительно теоретически оптимального ЛКГ-управления.

3. Робастная область настройки контура соответствует T = 8–12 суток, в которой вариация СКО ошибки синхронизации не превышает 15 %; расхождение численной модели и эксперимента составляет 6–8 % по нестабильности частоты и не более 27 % по СКО ошибки синхронизации.

4. Для горизонта прогноза 7 суток предложенная упрощённая оценка даёт неопределённость 2,5–2,8 нс; это обеспечивает возможность автономной работы шкалы времени до 3 недель с сохранением отклонения от UTC менее 10 нс.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами международных ключевых сличений CCTF-K001.UTC «Calculation of the reference time scale UTC». Данные измерений UTC(KZ) по сигналам спутниковых навигационных систем и данные внутренних сравнений стандартов частоты ежедневно передаются в BIPM. На основе полученных данных BIPM формирует ежемесячные циркуляры (Circular T) [4] и еженедельные протоколы UTCr [16] с информацией об отклонении шкалы UTC относительно шкал участвующих лабораторий, включая UTC(KZ).

Достоверность обеспечивается также использованием современного откалиброванного метрологического оборудования; длительностью экспериментальных наблюдений (более 47 месяцев непрерывной работы, июнь 2022 – апрель 2026); согласованностью результатов численного моделирования и эксперимента; регулярными публикациями в Circular T; сравнением с результатами ведущих международных лабораторий времени и частоты.

По данным BIPM на март 2026 года [44, 98], система продолжает стабильно работать, что подтверждает долговременную устойчивость разработанного подхода.

Апробация и внедрение результатов

Разработанный алгоритм формирования национальной шкалы времени UTC(KZ) и методы повышения метрологических характеристик эталонного комплекса внедрены в ГЭВЧ РК, что подтверждается Актами о внедрении, выданными РГП «КазСтандарт». Система эксплуатируется непрерывно в течение более 47 месяцев с коэффициентом доступности 99,98 %.

Материалы диссертационной работы докладывались на следующих международных конференциях и мероприятиях:

– Международный конкурс «Лучший молодой метролог КООМЕТ-2025» (г. Ташкент, 11–13 ноября 2025);

– 11-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2025» (г. Томск, 16–18 сентября 2025);

– Летняя школа BIPM по метрологии времени и частоты (г. Севр, Франция, 9–11 сентября 2025);

– Постерная сессия, посвящённая 150-летию BIPM (г. Севр, Франция, 2025);

– III Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов «За нами будущее» (г. Санкт-Петербург, 11–14 июня 2024);

– VI Международный форум «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции» (г. Томск, 2024);

– XI Международный симпозиум «Метрология времени и пространства» (Московская область, Менделеево, 27–29 сентября 2023);

– X Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023» (г. Томск, 26–29 сентября 2023);

– II Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов «За нами будущее» и X Международный конкурс «Лучший молодой метролог КООМЕТ-2023» (г. Екатеринбург, 2023);

– V Международный форум «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции» (г. Томск, 2023).

Результаты работы отмечены следующими наградами:

– диплом II степени V Международного форума «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции» за доклад «Алгоритм формирования национальной шкалы времени UTC(KZ) на основе пассивных водородных стандартов частоты и времени» (г. Томск, 24–25 ноября 2022);

– диплом I степени в области прикладной метрологии X Международного конкурса «Лучший молодой метролог КООМЕТ-2023» за доклад «Реализация метода автоподстройки национальной шкалы времени UTC(KZ) с помощью еженедельных данных Rapid UTC» (г. Екатеринбург, 14 июня 2023);

– диплом I место в конкурсе «Лучший молодой метролог года», организованном в честь 100-летия метрологии Республики Казахстан (г. Семей, 20 мая 2023);

– диплом II степени X Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023» за доклад «Алгоритм формирования национальной шкалы времени UTC(KZ) на основе пассивных водородных стандартов частоты и времени» (г. Томск, 26–29 сентября 2023);

– свидетельство об участии в международном конкурсе «Лучший молодой метролог МГС СНГ-2024» с докладом «Анализ долговременных характеристик пассивных водородных стандартов частоты и времени» (г. Санкт-Петербург, 14 июня 2024);

– сертификат об участии в международной летней школе «BIPM UTC Summer School» (г. Севр, Франция, 9–11 сентября 2025);

– диплом II степени 11-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2025» за доклад «Анализ долговременных характеристик пассивных водородных стандартов частоты и времени» (г. Томск, 16–18 сентября 2025);

– сертификат III степени Международного конкурса «Лучший молодой метролог КООМЕТ-2025» за доклад «Анализ неопределённости прогноза шкал времени пассивных водородных стандартов частоты» (г. Ташкент, 13 ноября 2025).

Личный вклад автора

Личный вклад автора является определяющим на всех этапах работы. Автором лично разработан алгоритм автоматической подстройки UTC(KZ) на основе еженедельных коррекций частоты формирователя VCH-317 по данным Rapid UTC; выполнено построение математической модели, численное моделирование и оптимизация параметров; разработаны методики компенсации дрейфа, температурных вариаций и фильтрации выбросов; проведены все экспериментальные исследования (47 месяцев непрерывных наблюдений); создан программный комплекс управления и мониторинга (17 модулей, ~11 300 строк на Python); выполнена модернизация аппаратуры и организована передача данных в BIPM. В совместных работах с к.ф.-м.н. Мишагиным К. Г. вклад соавтора состоит в разработке теоретических основ метода ЛКГ-управления и консультациях при адаптации алгоритма к пассивным водородным стандартам.

Публикации

Результаты диссертационных исследований опубликованы в 18 работах, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК [35, 45, 46], 1 переводная статья [47], 4 статьи в других журналах [48–51], 9 публикаций в материалах научных конференций [52–60] и 1 научный постер. Кроме того, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программного обеспечения.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём работы составляет 154 страницы, включая 63 рисунка, 48 таблиц, 5 приложений. Список литературы содержит 120 наименований.

Глава 1. Экспериментальное исследование характеристик пассивных водородных стандартов частоты

Настоящая глава посвящена экспериментальному исследованию характеристик трёх пассивных водородных стандартов частоты VCH-1008 [37] из состава Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени Республики Казахстан (ГЭВЧ РК) [35, 61], введённых в эксплуатацию в декабре 2021 года.

1.1 Состав и структура эталонного комплекса ГЭВЧ РК

Водородные стандарты частоты делятся на активные и пассивные [10, 11]. В активных стандартах реализуется автогенерация колебаний на частоте сверхтонкого перехода атома водорода (1 420,405 751 МГц) [10]. В пассивных используется внешний кварцевый генератор, стабилизированный по атомному резонансу [14].

Активные водородные мазеры обеспечивают наименьшую кратковременную нестабильность частоты ($\sigma_y(1\ с) \approx 1{,}5\times10^{-13}$, $\sigma_y(1\ сут) \approx 2\times10^{-16}$) [10, 11], но требуют сложного вакуумного оборудования и имеют стоимость 300 000–480 000 долл. США.

Пассивные водородные стандарты частоты (ПВСЧ) представляют собой компромисс между нестабильностью и стоимостью [11, 14]. Они имеют меньшие габариты и потребляют не более 100 Вт. Российские разработки в области ПВСЧ представлены серией Ч1-76 [36] и современными моделями VCH-1008 [37]. В таблице 1.1 приведены сравнительные характеристики основных типов стандартов частоты по ключевым метрологическим и эксплуатационным параметрам.

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики типов стандартов частоты

Тип стандарта	**σ_y(1 сут)**	**Дрейф частоты ($\times10^{-16}$/сут)**	**Стоимость (тыс. долл.)**	**Потребление (Вт)**
Активный H-maser	2×10^{-16}	≤ 1 (после 1 года работы)	300–480	до 150
Пассивный H-maser	1×10^{-15}	~5 (паспорт[1]); 2–4 (эксперимент[2])	50–80	до 100
Cs фонтан	3×10^{-16}	< 0,5	2 000–5 000	500–1 000
Коммерческий Cs	5×10^{-14}	5–20	50–70	30–50
Рубидиевый	5×10^{-13}	10–50	5–15	15–30

[1] Паспортный дрейф VCH-1008: $< 5\times10^{-14}$/месяц ≈ $1{,}7\times10^{-15}$/сут [37].
[2] Экспериментальный дрейф: $(2{,}1–3{,}9)\times10^{-16}$/сут [45, 47].

Из таблицы 1.1 видно, что ПВСЧ обеспечивают наилучшее соотношение нестабильность/стоимость для задач формирования национальных шкал времени [11, 14]. Для сравнения, цезиевые фонтаны [12, 13, 62, 63] обеспечивают наивысшую точность ($\sigma_y \approx 1\times10^{-16}$), но требуют затрат 2–5 млн долл. США и высококвалифицированного персонала.

На рисунке 1.1 представлено сравнение пяти типов атомных стандартов по четырём параметрам: нестабильности σ_y(1 сут), долговременному дрейфу, капитальным затратам и потребляемой мощности. Для VCH-1008 на графике дрейфа приведены паспортное ($1{,}7\times10^{-15}$/сут) и экспериментальное ($(2{,}1–3{,}9)\times10^{-16}$/сут) значения [45, 47]. Из рисунка видно, что ПВСЧ занимают промежуточное положение между активными мазерами и коммерческими цезиевыми стандартами, обеспечивая приемлемую нестабильность при существенно меньших затратах.

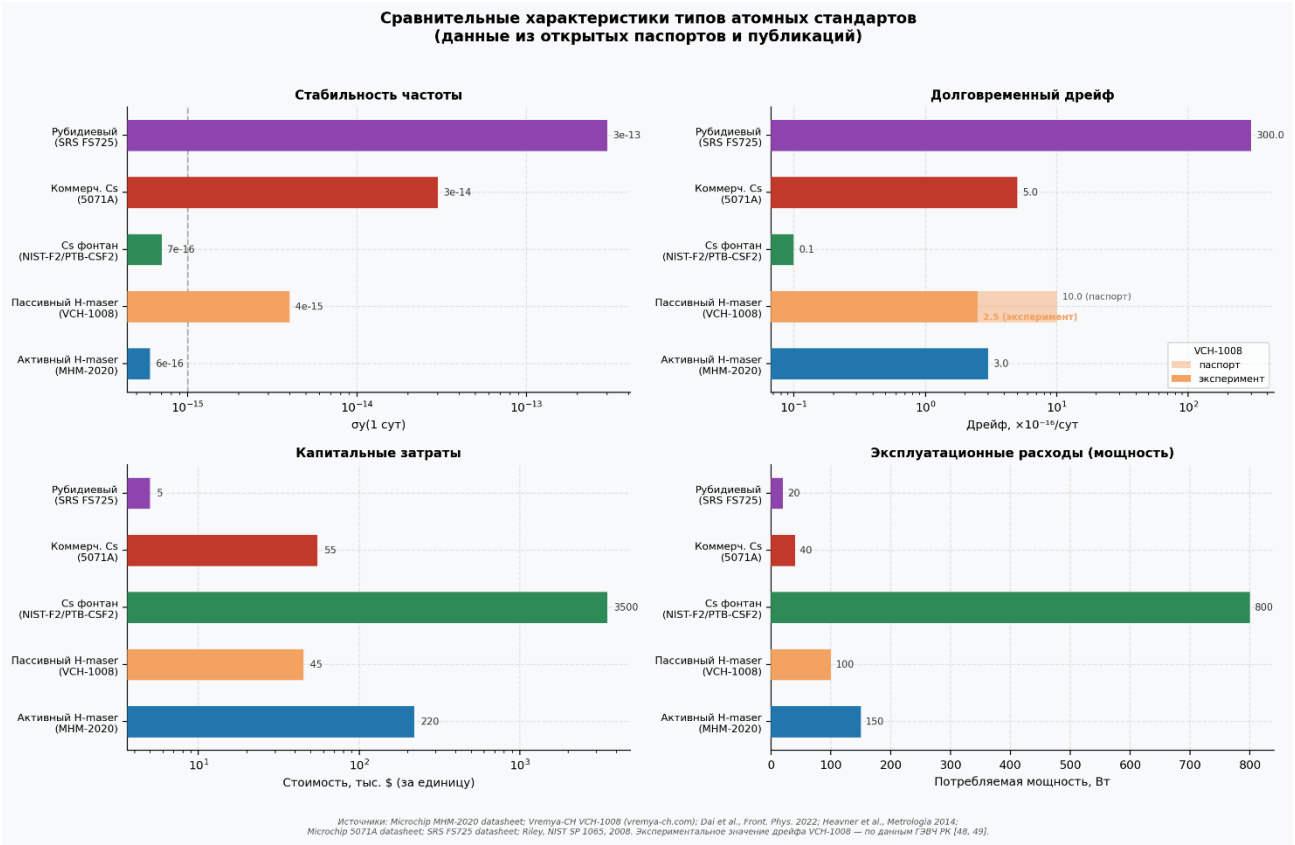


Рисунок 1.1 – Сравнительные характеристики типов атомных стандартов частоты

На рисунке 1.2 показан общий вид серверного помещения ГЭВЧ РК с размещённым оборудованием эталонного комплекса.



Рисунок 1.2 – Внешний вид ГЭВЧ РК

В таблице 1.2 приведён состав основного метрологического и вспомогательного оборудования эталонного комплекса ГЭВЧ РК. Комплекс обеспечивает воспроизведение, хранение и передачу единиц времени и частоты [64], а также непрерывный мониторинг метрологических характеристик стандартов.

Таблица 1.2 – Основное оборудование эталонного комплекса ГЭВЧ РК

Наименование	**Модель**	**Производитель**	**Кол-во**	**Назначение**
ПВСЧ	VCH-1008	АО «Время-Ч»	3	Воспроизведение и хранение единиц частоты и времени
Формирователь эталонных частот	VCH-317	АО «Время-Ч»	1	Формирование национальной шкалы времени UTC(KZ)
Компаратор фазовый многоканальный	VCH-315M	АО «Время-Ч»	1	Сравнение частот стандартов
ГНСС-приёмник	GTR55	MESIT	1	Сравнение с UTC
Климатическая камера	VCH-A18	АО «Время-Ч»	2	Термостабилизация РНМ 1, РНМ 2
Измеритель влажности и температуры	ИВТМ-7М	АО «ЭКСИС»	1	Мониторинг температуры и относительной влажности

Продолжение таблицы 1.2

Наименование	**Модель**	**Производитель**	**Кол-во**	**Назначение**
Источник бесперебойного питания	FORTE-T 60 кВА	FORTE	1	Резервное питание
Сервер на базе LINUX	SuperMicro	Super Micro Computer	1	Обработка данных, управление

На рисунке 1.3 представлена принципиальная схема ГЭВЧ РК, отражающая взаимодействие основных элементов комплекса: трёх ПВСЧ VCH-1008, формирователя эталонных частот VCH-317, фазового компаратора VCH-315M и ГНСС-приёмника GTR55. Сигналы от всех трёх стандартов непрерывно сравниваются компаратором, ведущий стандарт РНМ 1 подаёт опорный сигнал на VCH-317, который формирует выходные сигналы UTC(KZ). Сравнение с UTC осуществляется через ГНСС-приёмник GTR55 по методу GPS P3 (двухчастотные наблюдения на частотах L1/L2) в формате CGGTTS [21, 22].

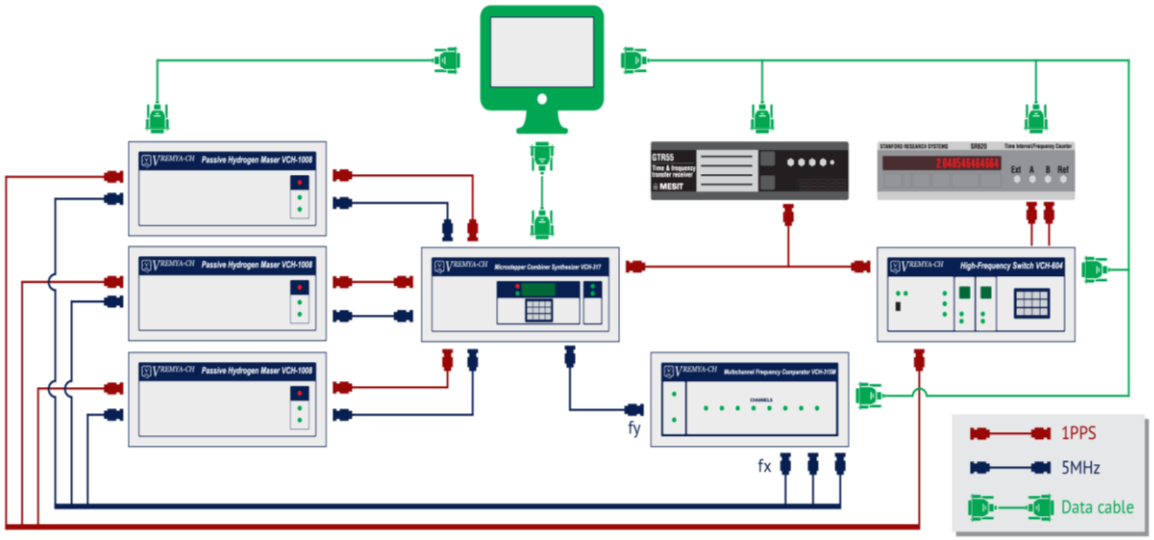


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема ГЭВЧ РК

1.1.1 Пассивный водородный стандарт частоты VCH-1008

Пассивный водородный стандарт частоты VCH-1008 (рисунок 1.4) разработан АО «Время-Ч» (Н. Новгород, Россия) [37]. Принцип работы ПВСЧ основан на использовании атомного резонанса водорода для стабилизации внешнего кварцевого генератора [10, 14]. Основные технические характеристики представлены в таблице 1.3.

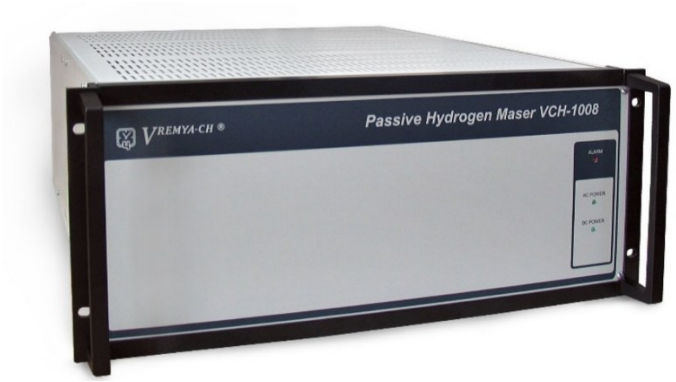


Рисунок 1.4 – Пассивный водородный стандарт частоты VCH-1008

Таблица 1.3 – Технические характеристики VCH-1008 [37]

Параметр	Значение	Примечание
Номинальная частота	5 МГц	$\pm 5\times10^{-13}$ начальная расстройка
Кратковременная нестабильность	$\sigma_y(1\ с) < 5\times10^{-13}$	Паспорт [37]
Долговременная нестабильность	$\sigma_y(1\ 000\ с) < 1\times10^{-14}$	Паспорт [37]
Дрейф частоты	$< 5\times10^{-14}$/месяц ($\approx 1{,}7\times10^{-15}$/сут)	Паспорт [37]
Диапазон управления	$\pm 1\times10^{-11}$	Электронная подстройка
Температурный коэффициент частоты	$< 1\times10^{-14}$/°C	При T = 20–25 °C
Потребляемая мощность	55 Вт	Установившийся режим
Время прогрева	48 часов	До достижения спецификаций

На ГЭВЧ РК эксплуатируются три стандарта VCH-1008:

– РНМ 1 (серийный номер 10221) – ведущий стандарт, размещён в климатической камере VCH-A18;

– РНМ 2 (серийный номер 10521) – резервный стандарт, размещён в климатической камере VCH-A18;

– РНМ 3 (серийный номер 26620) – дополнительный стандарт, размещён в комнате с кондиционированием.

1.1.2 Система сравнения времени по ГНСС

Для сравнения UTC(KZ) с UTC используется двухчастотный ГНСС-приёмник GTR55 (рисунок 1.5), зарегистрированный в системе BIPM под идентификатором KZ04. Приёмник

обеспечивает одновременную работу в нескольких режимах сравнения времени; данные во всех режимах представляются в формате CGGTTS и передаются в BIPM.



Рисунок 1.5 – ГНСС-приёмник GTR55

В настоящее время в метрологии времени и частоты применяются следующие основные методы сравнения шкал времени [65].

Метод GPS All-in-View (MC). Метод многоканального сравнения с одновременным наблюдением всех видимых спутников GPS [21, 22]. Обеспечивает точность 3–5 нс. На ГЭВЧ РК данный метод не применяется в качестве основного, однако он до сих пор используется рядом действующих лабораторий времени, прежде всего в качестве резервного или верификационного канала.

Метод GPS PPP. Метод точного позиционирования (Precise Point Positioning) с использованием двухчастотных наблюдений и постобработанных точных эфемерид и поправок часов спутников IGS [23, 24]. Обеспечивает точность 1–2 нс. На ГЭВЧ РК применяется как дополнительный канал верификации результатов (рисунок 1.6).

Метод GPS P3 (UTC link). Основной метод сравнения UTC(KZ) с UTC, принятый BIPM для формирования TAI [19, 20]. Использует ионосферно-свободную линейную комбинацию двухчастотных наблюдений на частотах L1/L2 (код P3) в режиме All-in-View с калибровкой кабельных задержек (AV/L2U CLB). Данные передаются в BIPM от приёмника GTR55 (KZ04) и используются для вычисления [UTC − UTC(KZ)] в Circular T [4]. Типичное СКО невязок сглаживания составляет 0,815 нс по каналу (KZ04, PT13) (рисунок 1.6).

Двусторонний метод сличения через спутник (TWSTFT). Метод двустороннего сличения шкал времени через геостационарный спутник связи (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) [66, 67]. Принцип метода основан на одновременном обмене сигналами между двумя наземными станциями через спутник-ретранслятор: поскольку сигналы проходят практически симметричные пути, большинство погрешностей распространения взаимно компенсируется. Метод обеспечивает точность сличения 0,5–1 нс и применяется рядом ведущих лабораторий времени – в частности PTB, USNO, NICT – в качестве независимого высокоточного канала

сравнения и для калибровки ГНСС-каналов. На ГЭВЧ РК данный метод в настоящее время не используется ввиду отсутствия необходимой наземной станции и спутникового ресурса.

Сравнительные характеристики рассмотренных методов ГНСС-сравнения представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Характеристики методов сравнения времени по ГНСС

Метод	Точность	Задержка данных	Применение
GPS All-in-View (MC) [21, 22]	3–5 нс	1 сутки	Региональные сравнения; ряд лабораторий времени
GPS PPP [23, 24]	1–2 нс	~1 сутки (rapid IGS); ~2 недели (final IGS)*	Дополнительный канал верификации на ГЭВЧ РК
GPS P3 [22, 23]	1–2 нс	1 сутки	Основной канал ГЭВЧ РК; формирование TAI
TWSTFT [66, 67]	0,5–1 нс	реальное время	Ведущие лаборатории; калибровка ГНСС-каналов

** IGS публикует rapid-эфемериды с задержкой ~17 ч; финальные (final) эфемериды – с задержкой 12–18 суток.*

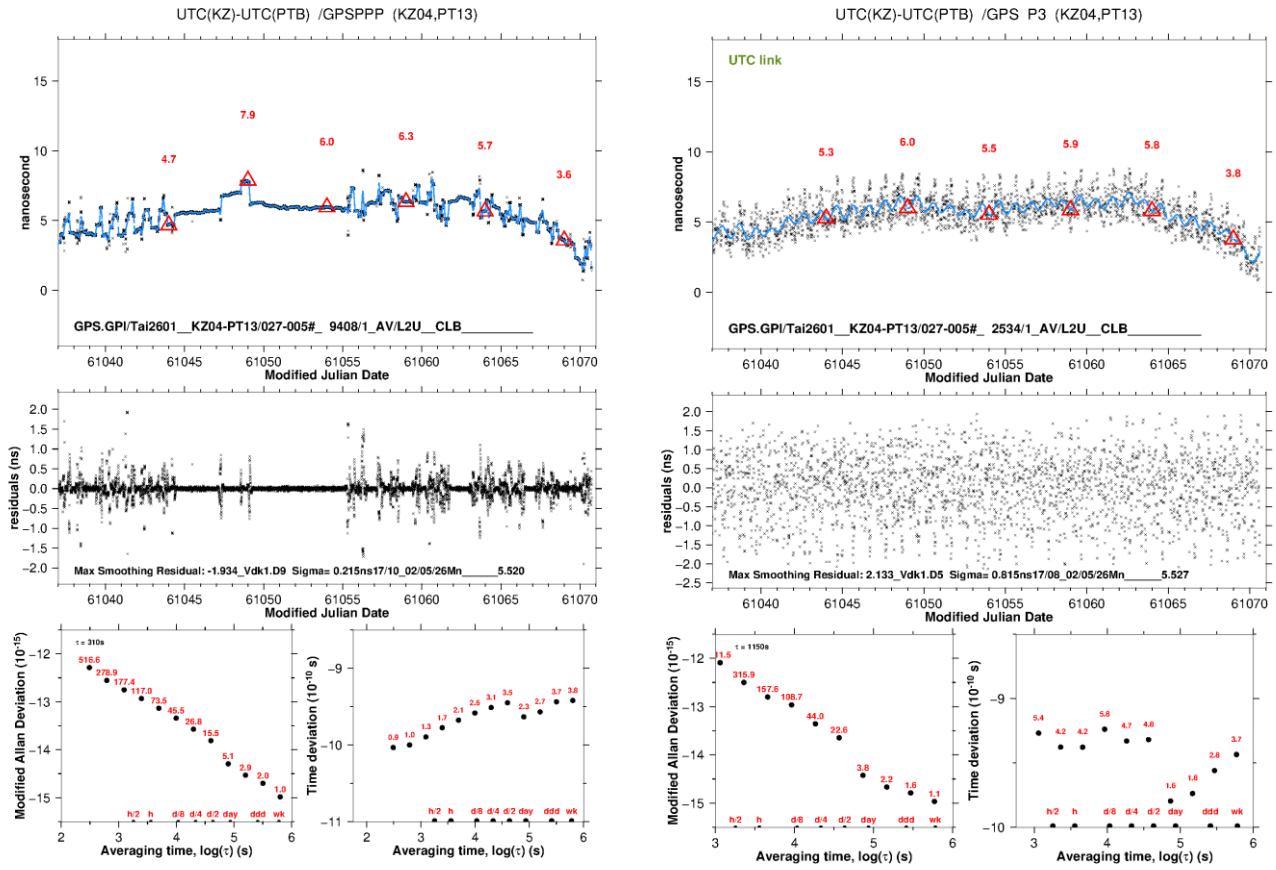


Рисунок 1.6 – Результат сравнения UTC(KZ) − UTC(PTB) по каналам GPS PPP и GPS P3

1.1.3 Публикации BIPM (Circular T и Rapid UTC)

ГЭВЧ РК на постоянной основе с 2008 года участвует в международных ключевых сличениях CCTF-K001.UTC «Calculation of the reference time scale UTC», организуемых Консультативным комитетом по времени и частоте (CCTF) BIPM. Данные о поведении национальной шкалы времени UTC(KZ) публикуются в бюллетенях BIPM [35].

BIPM публикует два официальных продукта, используемых для оценки и управления национальными шкалами времени. Примеры данных Circular T и UTCr представлены на рисунке 1.7.

Circular T – ежемесячный бюллетень BIPM [4], содержащий окончательные значения [UTC − UTC(k)] для всех лабораторий, участвующих в формировании TAI. Публикуется с задержкой 30–45 суток по отношению к отчётному периоду. Точность значений составляет 1–2 нс. Circular T является официальным документом, подтверждающим соответствие национальной шкалы времени требованиям BIPM [5, 68].

Rapid UTC (UTCr) – еженедельная оперативная реализация UTC [16, 39], публикуемая BIPM с задержкой 3–4 суток. Типичная неопределённость UTCr составляет ~2 нс [39]. В отличие от Circular T, UTCr предназначен прежде всего для оперативного управления национальными шкалами времени в режиме, близком к реальному времени, и используется в алгоритме управления UTC(KZ), описанном в главе 2.

Практически важной особенностью данных UTCr является возможность периодических коррекций расчётной шкалы, выполняемых BIPM. Такие коррекции проявляются в виде синхронных скачков значений UTC − UTC(k) для всех лабораторий-участниц. Наибольший подобный скачок за период наблюдения 2022–2024 гг. зафиксирован 10 апреля 2023 г. (MJD 60044) [45]. Указанные разрывы снижают точность оценки отклонения шкалы UTC(KZ) относительно UTC и оказывают негативное влияние на точность автоподстройки. Наличие разрывов объясняет также необходимость включения компоненты белого частотного шума в модель опорного сигнала при численном моделировании алгоритма управления (глава 2), что позволяет корректно описать наблюдаемый наклон графика нестабильности σ_3 на малых интервалах времени [45].

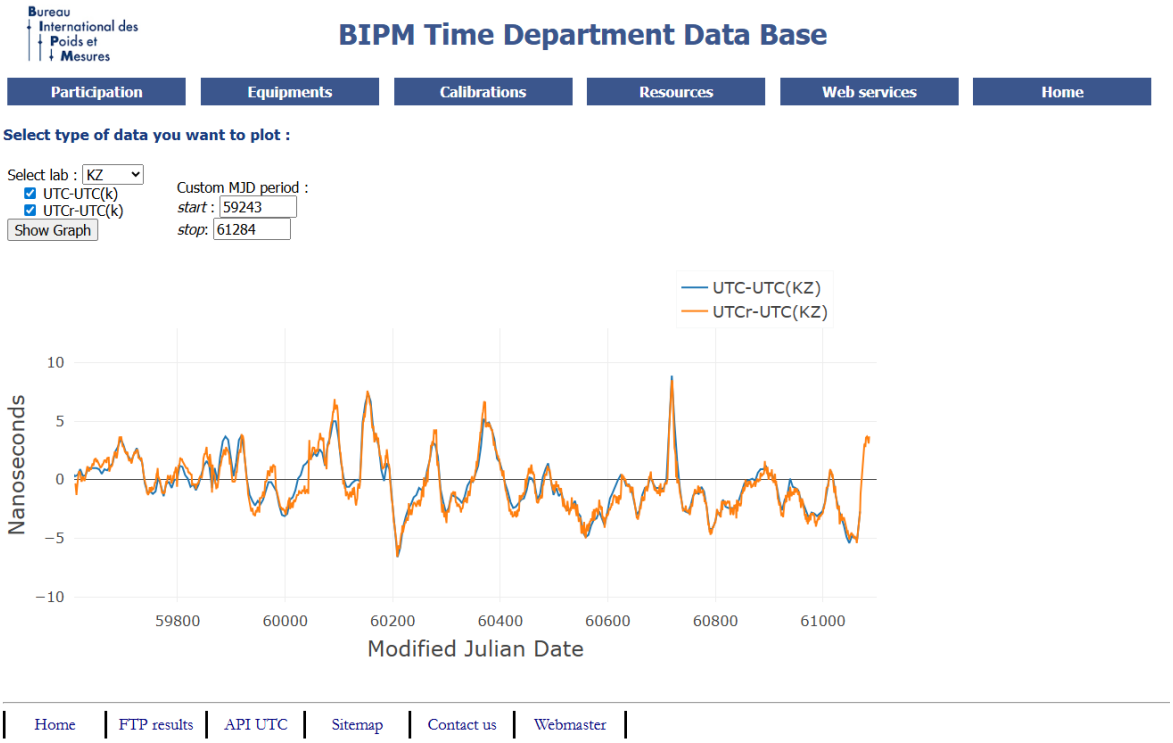


Рисунок 1.7 – Публикации BIPM: Circular T и Rapid UTC

1.1.4 Система формирования и управления выходными сигналами

Для применения управляющих воздействий к формированию выходных сигналов UTC(KZ) используется управляемый синтезатор частоты VCH-317 (АО «Время-Ч»). Прибор принимает опорный сигнал 5 МГц от ведущего стандарта РНМ 1 и формирует набор выходных частот с возможностью прецизионной электронной подстройки фазы и частоты (рисунок 1.8). Управление осуществляется через интерфейс RS-232/Ethernet с разрешением коррекции фазы 1 пс. Основные технические характеристики VCH-317 приведены в таблице 1.5.



Рисунок 1.8 – Формирователь эталонных частот VCH-317

Таблица 1.5 – Технические характеристики VCH-317

Параметр	Значение	Примечание
Входная частота	5 МГц	От РНМ 1
Выходные частоты	5 МГц, 10 МГц, 100 МГц	Синусоидальный сигнал
	1 PPS (1 импульс/с)	TTL/CMOS уровни
Разрешение фазовой коррекции	1 пс	Дискретность подстройки
Диапазон частотной подстройки	$\pm 1\times10^{-11}$	Относительный
Время установления	< 1 мкс	После команды коррекции
Кратковременная нестабильность	$< 1\times10^{-13}$ (1 с)	Собственный вклад
Долговременная нестабильность	Определяется входным сигналом	Прозрачен для > 1 000 с
Интерфейс управления	RS-232, Ethernet (TCP/IP)	115 200 бод / 100 Мбит/с
Потребляемая мощность	25 Вт	Установившийся режим
Время прогрева	1 час	До достижения спецификаций

Еженедельно (каждый четверг в 08:00 UTC) алгоритм управления UTC(KZ) (см. главу 2) вычисляет управляющее воздействие u_y и передаёт команду коррекции частоты на VCH-317:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = u_y \tag{1.1}$$

где Δf – изменение частоты выходного сигнала, Гц; f_0 – номинальная частота выходного сигнала (5 МГц), u_y – безразмерное относительное изменение частоты, вычисленное ПИ-регулятором.

VCH-317 применяет коррекцию к частоте выходного сигнала путём изменения коэффициента деления в цифровом синтезаторе прямого синтеза (DDS). Благодаря высокому разрешению (1×10^{-15}) синтезатор обеспечивает точное следование за заданным значением частоты без дискретизационных скачков.

1.1.5 Компаратор фазовый многоканальный VCH-315M

Для непрерывного сравнения частот трёх стандартов VCH-1008 между собой используется компаратор фазовый VCH-315M (рисунок 1.9). Основные характеристики прибора: число каналов – 16; частота сравнения – 5 МГц; погрешность измерения фазы – менее 50 пс; период измерений – 1 секунда; интерфейс – Ethernet (TCP/IP). Компаратор обеспечивает

непрерывный сбор данных с частотой 1 Гц, что составляет ~8,64×10⁴ измерений в сутки для каждой пары стандартов.



Рисунок 1.9 – Компаратор фазовый многоканальный VCH-315M

1.1.6 Климатическая камера VCH-A18

Для минимизации влияния температурных вариаций стандарты РНМ 1 и РНМ 2 размещены в климатической камере VCH-A18. Основные характеристики: диапазон поддерживаемых температур – 15–30 °C; точность поддержания температуры – ± 0,2 °C; нестабильность температуры – ± 0,1 °C/час; внутренний объём – 500 литров; потребляемая мощность – 800 Вт. Стандарт РНМ 3 размещён в комнате с кондиционированием воздуха, что позволяет исследовать температурную чувствительность ПВСЧ в реальных условиях эксплуатации.

1.2 Характеристики нестабильности частоты

1.2.1 Девиация Аллана

Основным методом характеризации нестабильности атомных часов является девиация Аллана, определённая в 1966 году [17]. Девиация Аллана позволяет разделить различные типы шумовых процессов и оценить их вклад в общую нестабильность на разных интервалах времени. Стандартизация методов анализа нестабильности представлена в IEEE 1139-2022 [18] и руководстве NIST [69].

Классическая двухвыборочная девиация Аллана определяется как:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{\langle(\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2\rangle}{2} \tag{1.2}$$

где $\bar{y}_i$ – среднее значение относительного отклонения частоты на i-м интервале длительностью τ.

Для перекрывающейся оценки девиация вычисляется на всех доступных данных:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \quad (1.3)$$

где N – число интервалов усреднения.

1.2.2 Модифицированная и параболическая девиации

Модифицированная девиация Аллана (mod σ_y) [69, 70] использует усреднение с большей базой данных и лучше подавляет белый фазовый шум. Сравнение различных вариантов девиации представлено в работах [71–73]; динамическая девиация Аллана, позволяющая обнаруживать нестационарные изменения в поведении часов, предложена в [74].

Модифицированная девиация определяется как:

$$\mathrm{mod}\ \sigma_y^2(\tau) = \left(\frac{1}{2n_0^2\tau_0^2}\right) \cdot \left(\frac{1}{N'}\right) \cdot \Sigma_j \left[\Sigma_k\, x(j+k+n_0) - x(j+k)\right]^2 \quad (1.4)$$

где $n_0 = \frac{\tau}{\tau_0}$, τ_0– базовый интервал измерений, N' – число доступных точек данных.

Параболическая девиация $\sigma_z(\tau)$ [75, 76] особенно чувствительна к дрейфу частоты и используется для оценки долговременной нестабильности, связанной с детерминированными процессами старения [77]. В отличие от классической девиации Аллана [17], параболическая девиация не удаляет линейный тренд, что делает её предпочтительной для оценки эффективности компенсации дрейфа.

1.2.3 Стохастические модели шумов

Шумовые процессы в атомных часах моделируются как сумма степенных законов вида:

$$S_y(f) = \sum h_\alpha \cdot f^\alpha \quad (1.5)$$

где α принимает значения от −4 до +2, соответствующие различным физическим процессам [17, 69].

Математические модели атомных часов на основе стохастических дифференциальных уравнений представлены в работах [43, 78]. Для водородных стандартов доминирующими являются белый частотный шум (α = −2) и шум случайных блужданий частоты (α = −4) [10, 77]. Основные типы шумовых процессов и соответствующие им степенные законы систематизированы в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Типы шумовых процессов в атомных стандартах

Название	Обозначение	$S_y(f)$	$\sigma_y(\tau)$	Физический механизм
Белый фазовый шум	WPM	f^0	τ^{-1}	Дробовой шум фотодетектора [79]
Фликкер-шум фазы	FPM	f^{-1}	τ^{-1}	1/f шумы электроники [79]
Белый частотный шум	WFM	f^{-2}	$\tau^{-1/2}$	Тепловой шум резонатора [10, 73]
Фликкер-шум частоты	FFM	f^{-3}	τ^0	Флуктуации параметров среды [73]
Случайные блуждания	RWFM	f^{-4}	$\tau^{1/2}$	Старение компонентов [73, 80]

1.3 Дрейф частоты пассивных водородных стандартов

1.3.1 Физические механизмы дрейфа

Дрейф частоты – медленное систематическое изменение частоты атомного стандарта со временем, обусловленное процессами старения физических компонентов [77, 79]. Для водородных стандартов типичный дрейф составляет (1–5)×10^{-16}/сут [10, 11]. Физические механизмы дрейфа в ПВСЧ связаны с изменением свойств резонатора, деградацией покрытия стенок и изменением параметров диссоциатора [77, 81].

1.3.2 Методика оценки дрейфа

Для оценки дрейфа частоты используется линейная регрессия относительного отклонения частоты:

$$y(t) = y_0 + D \cdot t \tag{1.6}$$

где y_0 – начальное отклонение частоты; D – скорость дрейфа, безразмерный/сут; t – время, сутки.

Оценка дрейфа выполняется методом наименьших квадратов на скользящем окне длительностью T_{window} = 30 суток с шагом 7 суток. Результаты оценки дрейфа частоты для трёх стандартов представлены в таблице 1.7.

1.3.3 Экспериментальные результаты

Таблица 1.7 – Дрейф частоты стандартов VCH-1008 (период декабрь 2021 – декабрь 2024)

Стандарт	Период	D (×10⁻¹⁶/сут)	σ(D)	R²	Примечание
РНМ 1	Дек. 2021 – Фев. 2022	-3,9	0,4	0,87	Начальный период
	Март 2022 – наст. время	-1,2	0,2	0,92	После компенсации
РНМ 2	Дек. 2021 – Фев. 2022	-2,1	0,3	0,84	Начальный период
	Март 2022 – наст. время	-2,3	0,3	0,89	После компенсации
РНМ 3	Дек. 2021 – Фев. 2022	-2,7	0,5	0,81	Начальный период
	Март 2022 – наст. время	-1,8	0,4	0,85	После компенсации

Примечание. *Начальные значения дрейфа получены на основе данных кодовых измерений сигналов ГНСС в дифференциальном режиме относительно UTC(SU) [45, 47].*

Для РНМ 1 и РНМ 3 начальный дрейф снижен в 3,3 и 1,5 раза соответственно (с $3{,}9\times10^{-16}$ до $1{,}2\times10^{-16}$/сут и с $2{,}7\times10^{-16}$ до $1{,}8\times10^{-16}$/сут); для РНМ 2 изменение статистически незначимо (в пределах погрешности $\sigma(D) = 0{,}3\times10^{-16}$/сут). РНМ 1 демонстрирует наименьший остаточный дрейф ($1{,}2\times10^{-16}$/сут) и выбран в качестве ведущего стандарта. Высокий коэффициент детерминации $R^2 > 0{,}85$ подтверждает линейный характер дрейфа на всём интервале наблюдения.

1.3.4 Компенсация дрейфа

Компенсация дрейфа осуществляется путём периодической автоматической коррекции кода синтезатора стандарта на основе оценённого коэффициента линейного дрейфа D.

Единица изменения кода синтезатора соответствует дискрету частоты $df = 1\times10^{-15}$. Для текущего значения суточного дрейфа D рассчитывается период T между последовательными коррекциями кода:

$$T = df \cdot \frac{86400}{|D|} = (1 \times 10^{-15} \cdot 86400)/|D| \text{ (с)} \quad (1.7)$$

где 86 400 – число секунд в сутках.

Программа управления автоматически отправляет команду с обновлённым кодом синтезатора каждые T секунд, увеличивая или уменьшая его на единицу в зависимости от знака дрейфа. Таким образом, суммарное изменение частоты за сутки точно компенсирует текущий дрейф D.

Суммарная компенсирующая поправка частоты за интервал времени t:

$$\Delta f_{comp}(t) = -D \cdot t \quad (1.8)$$

где D – скорость линейного дрейфа, оценённый методом наименьших квадратов на скользящем 30-суточном окне (раздел 1.3.2).

Расчётное значение Δf_{comp} суммируется с управляющей поправкой по данным UTCr, что исключает двойной учёт дрейфа в алгоритме управления шкалой времени (см. главу 2).

Эффективность компенсации определяется как:

$$\eta = \frac{D_{initial} - D_{residual}}{D_{initial}} \times 100\% \quad (1.9)$$

Результаты для трёх стандартов: РНМ 1: η = (3,9 − 1,2)/3,9 × 100 % = 69 %; РНМ 2: изменение дрейфа статистически незначимо (в пределах погрешности σ(D) = 0,3×10⁻¹⁶/сут); РНМ 3: η = (2,7 − 1,8)/2,7 × 100 % = 33 %.

1.3.5 Динамика дрейфа

Для каждого стандарта проверялась гипотеза о наличии систематического тренда изменения дрейфа со временем [45]. Использовалась линейная регрессия оценённого дрейфа D_i от времени t_i.

Результаты:

- РНМ 1 – тренд −0,08×10⁻¹⁶/сут² (p = 0,42, незначительный);
- РНМ 2 – тренд +0,05×10⁻¹⁶/сут² (p = 0,58, незначительный);
- РНМ 3 – тренд −0,12×10⁻¹⁶/сут² (p = 0,35, незначительный).

Дрейф частоты остаётся стабильным на протяжении 3 лет эксплуатации, что позволяет использовать постоянную модель компенсации [45]. Необходимо отметить, что при выпуске дрейф частоты пассивных водородных стандартов может составлять величину порядка нескольких единиц 10⁻¹⁵/сут [47]. Полученные при вводе в эксплуатацию ГЭВЧ РК значения ((2,1–3,9)×10⁻¹⁶/сут) уже на начальном этапе оказались на порядок меньше этой характерной величины. Внедрение системы автоматической компенсации дрейфа позволило дополнительно снизить его более чем на порядок: усреднённые суточные дрейфы составили 1,25×10⁻¹⁷±1,34×10⁻¹⁷, 2,31×10⁻¹⁷ ±1,09×10⁻¹⁷ и −1,33×10⁻¹⁷ ±1,33×10⁻¹⁷ для РНМ 1, РНМ 2 и РНМ 3 соответственно (доверительный интервал 95 %) [45, 47].

На рисунке 1.10 представлена динамика оценённого дрейфа частоты РНМ 1, вычисленного методом наименьших квадратов на скользящем 30-суточном окне. До внедрения компенсации (декабрь 2021 – февраль 2022) дрейф составлял −3,9×10⁻¹⁶/сут; после внедрения

(март 2022 – декабрь 2024) снизился до −1,2×10⁻¹⁶/сут, что соответствует эффективности η = 69 %.

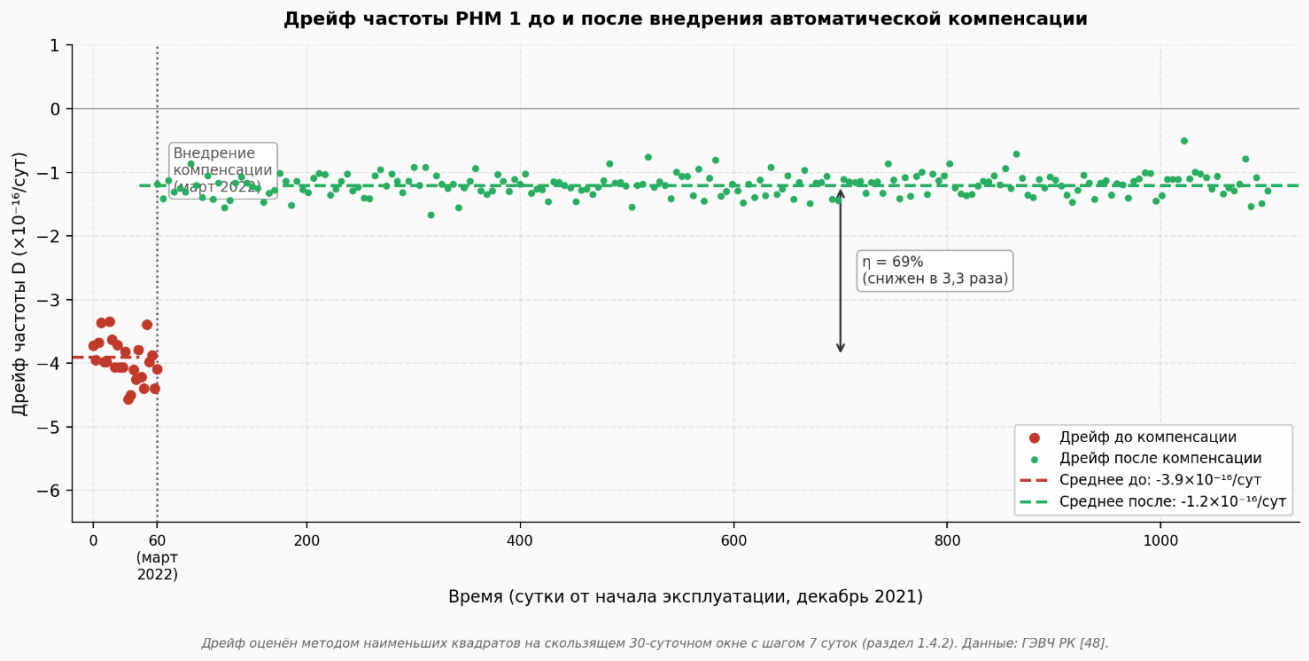


Рисунок 1.10 – Динамика дрейфа частоты РНМ 1 до и после внедрения автоматической компенсации

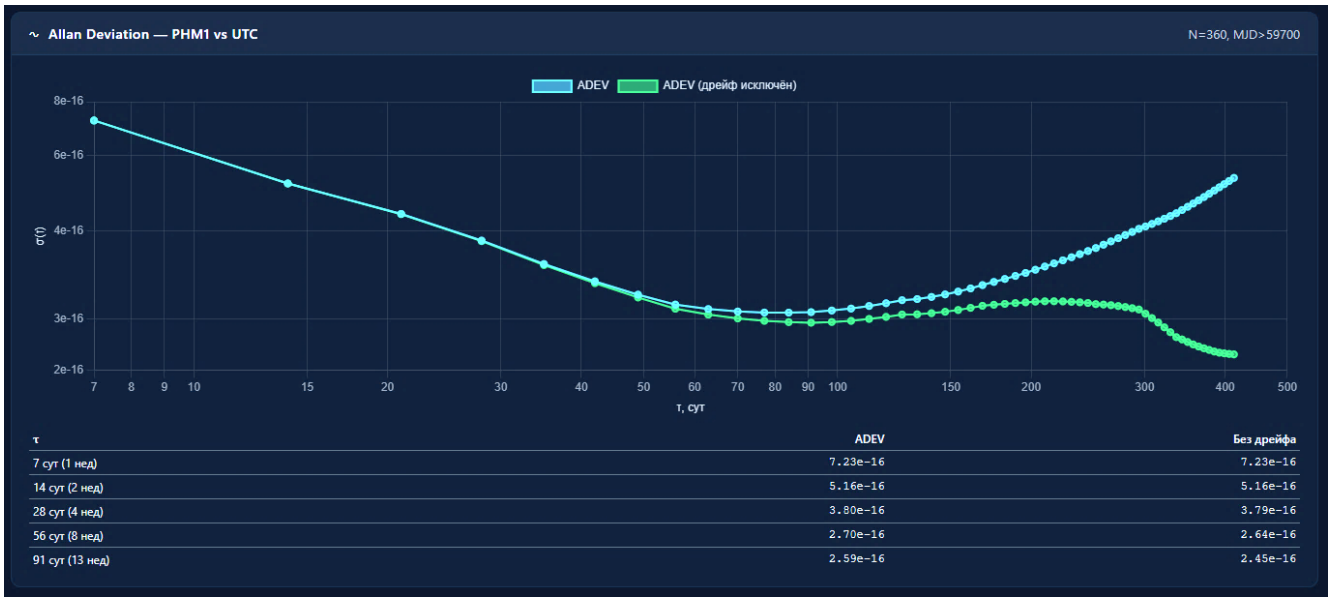


Рисунок 1.11 – Нестабильность частоты РНМ1 до и после внедрения автоматической компенсации

Линейная модель дрейфа верифицирована на интервале ~3 года. При долговременной эксплуатации (5–10 лет) возможно появление нелинейных компонент дрейфа вследствие старения резонатора и деградации вакуума. Для контроля адекватности модели рекомендуется

ежегодная переоценка коэффициента дрейфа и мониторинг остатков аппроксимации. Программа адаптивного управления, описанная в рекомендациях по дальнейшему развитию (Глава 4), позволит автоматически учитывать эти изменения.

1.4 Долговременная нестабильность частоты

1.4.1 Девиация Аллана экспериментальная

Для корректного выбора параметров алгоритма управления необходимо идентифицировать доминирующие типы шумовых процессов [18, 69]. Используется метод аппроксимации графика девиации Аллана степенной функцией $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{\mu}$ [17], где показатель μ связан с типом шума. Соотношения между показателем наклона и типом шума приведены в таблице 1.9. Экспериментальные значения девиации Аллана для трёх стандартов на различных интервалах осреднения представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Девиация Аллана стандартов VCH-1008 (экспериментальные данные)

Интервал τ	**РНМ 1**	**РНМ 2**	**РНМ 3**	**Паспорт [37]**
1 с	$2{,}8\times10^{-13}$	$3{,}1\times10^{-13}$	$3{,}5\times10^{-13}$	5×10^{-13}
10 с	$8{,}9\times10^{-14}$	$9{,}7\times10^{-14}$	$1{,}1\times10^{-13}$	2×10^{-13}
100 с	$2{,}8\times10^{-14}$	$3{,}2\times10^{-14}$	$3{,}8\times10^{-14}$	5×10^{-14}
1 000 с	$8{,}9\times10^{-15}$	$1{,}0\times10^{-14}$	$9{,}8\times10^{-15}$	–
1 сутки	$1{,}3\times10^{-15}$	$1{,}5\times10^{-15}$	$1{,}8\times10^{-15}$	3×10^{-15}
7 суток	$1{,}0\times10^{-15}$	$1{,}1\times10^{-15}$	$1{,}3\times10^{-15}$	–
30 суток	$1{,}4\times10^{-15}$	$1{,}6\times10^{-15}$	$1{,}9\times10^{-15}$	–

На рисунке 1.12 показана перекрывающаяся девиация Аллана стандартов РНМ 2 и РНМ 3 относительно опорного РНМ 1, измеренная компаратором VCH-315M за период декабрь 2021 – декабрь 2023 [53]. Минимальная нестабильность наблюдается на интервале $\tau = 7$ суток, что обосновывает выбор недельного периода управления.

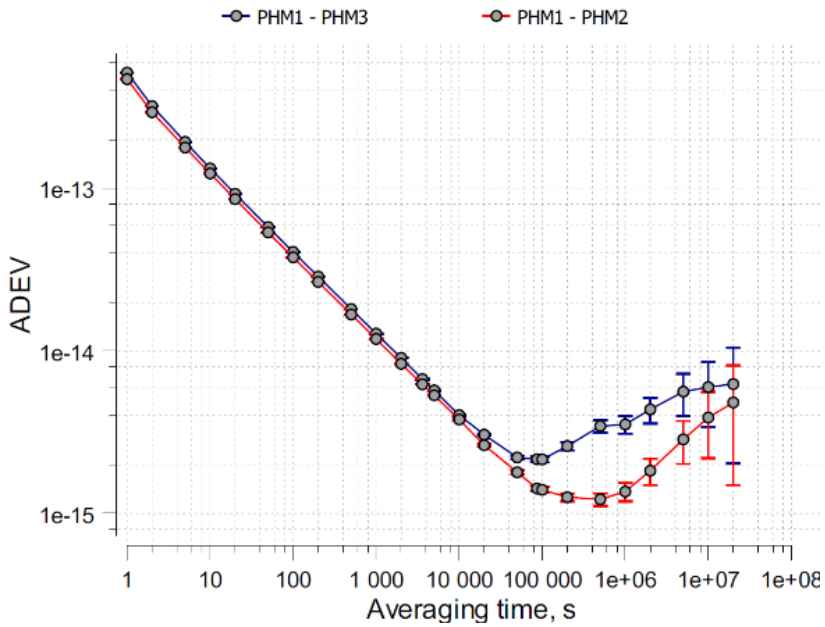


Рисунок 1.12 – Девиация Аллана стандартов РНМ 2 и РНМ 3 относительно РНМ 1

Все стандарты соответствуют паспортным требованиям [37]. Минимальная нестабильность частоты σ_y достигается на интервале τ = 7 суток, что обосновывает выбор недельного интервала управления. РНМ 1 демонстрирует наилучшую нестабильность: σ_y(7 сут) = $1{,}0\times10^{-15}$. Суточная нестабильность частоты стандартов РНМ 1 и РНМ 2, размещённых в климатических камерах, составляет около 10^{-15}, что соответствует характеристике активных водородных стандартов предыдущего поколения, таких как VCH-1005 [14]. Суточная нестабильность РНМ 3, расположенного вне климатической камеры и подверженного значительным температурным колебаниям (18–31 °C), при усреднении на длительном интервале составляет $2{,}1\times10^{-15}$, что укладывается в требования спецификации VCH-1008 [37].

1.4.2 Идентификация типов шумов

Таблица 1.9 – Соотношение между наклоном μ и типом шума

μ	**Тип шума**	**$S_y(f)$**	**Источник [18, 69]**
−1	WPM	f^{0}	Дробовой шум
−1	FPM	f^{-1}	1/f шум электроники
−1/2	WFM	f^{-2}	Тепловой шум
0	FFM	f^{-3}	Фликкер частоты
+1/2	RWFM	f^{-4}	Случайные блуждания

Аппроксимация графиков $\sigma_y(\tau)$ для VCH-1008 показывает:

– τ < 1 000 с: $\mu \approx -0{,}5$ (доминирует белый частотный шум) [10, 77];

– τ = 1 000–10^5 с: $\mu \approx 0$ (переход к фликкер-шуму частоты);

– $\tau > 10^5$ с: $\mu \approx +0{,}5$ (случайные блуждания частоты) [45, 47].

Это согласуется с теоретическими ожиданиями для ПВСЧ [77].

1.5 Температурный коэффициент частоты

1.5.1 Методика измерения ТКЧ

Частота водородного стандарта зависит от температуры резонатора [10, 81]. Для ПВСЧ типичный температурный коэффициент частоты (ТКЧ) составляет $(1–10)\times10^{-15}$/°C [37, 79]. Стандарты РНМ 1 и РНМ 2 размещены в климатической камере VCH-A18 с точностью поддержания температуры ± 0,2 °C. Физическая природа температурной зависимости связана с изменением размеров резонатора и сдвигом частоты при столкновениях атомов со стенками накопительного объёма [77, 81]. Результаты оценки ТКЧ для трёх стандартов приведены в таблице 1.10.

Отсутствие стабилизации температуры в помещении ГЭВЧ РК позволяет оценить температурную чувствительность пассивного водородного стандарта РНМ 3, а также проверить нестабильность данной чувствительности во времени.

Данные о температуре в помещении поступают от термогигрометра ИВТМ-7М и записываются с интервалом 10 с. Для анализа используются данные, представленные на рисунке 1.12 (с 19.02.2022 по 17.12.2023), в которых с помощью медианного фильтра исключены выбросы. Интервал усреднения разности частот составляет 10 000 с.

Для оценки влияния температуры на частоту стандарта РНМ 3 анализировалась разность частот РНМ 3 − РНМ 1 методом линейной регрессии, при этом влияние температуры на стандарт РНМ 1, расположенный в термокамере, считалось пренебрежимо малым. Компаратор, на котором измеряются разности частот, также расположен в термокамере. Числовые результаты оценки ТКЧ приведены в разделе 1.5.2 (таблица 1.10).

Коэффициент корреляции Пирсона между значениями температуры и разности частот РНМ 3 − РНМ 1 равен 0,79 при нулевом P-значении. Для сравнения коэффициент корреляции с разностью частот РНМ 2 − РНМ 1 на порядок меньше (~0,079), хотя P-значение, равное $2{,}4\cdot10^{-9}$, свидетельствует о слабой, но статистически значимой связи между температурой в помещении и разностью частот стандартов, размещённых в термокамерах. Коэффициент линейной зависимости частоты от температуры составил $3{,}72\cdot10^{-15}\pm8\cdot10^{-17}$ на 1 °C (доверительный интервал указан для вероятности 95 %). Согласно спецификации VCH-1008 [37] температурный коэффициент частоты не должен превышать $1\cdot10^{-14}$.

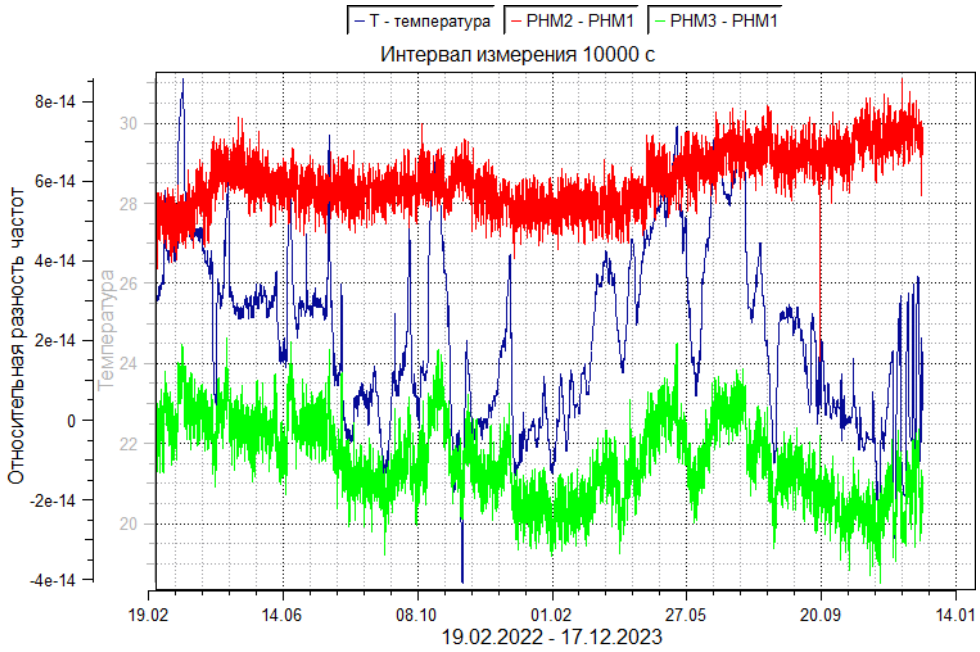


Рисунок 1.13 – Разность частот PHM2 (красный) и PHM3 (зеленый) относительно опорного PHM1, график температуры (синий)

Для оценки ТКЧ используется линейная регрессия:

$$y(t) = a + b \cdot T(t) \tag{1.10}$$

где: y(t) – относительное отклонение частоты; T(t) – температура стандарта, °C; b – температурный коэффициент частоты, безразмерный/°C.

1.5.2 Экспериментальные результаты

Таблица 1.10 – Температурный коэффициент частоты стандартов VCH-1008

Стандарт	ТКЧ (×10⁻¹⁵/°C)	σ(ТКЧ)	r	Диапазон ΔT (°C)
PHM 1	3,68	0,12	0,91	21,5–22,5
PHM 2	3,75	0,15	0,88	21,5–22,5
PHM 3	3,72	0,08	0,79	18–31
Среднее	3,72 ± 0,08	–	–	–
Паспорт [37]	< 10	–	–	20–25

Примечание. r – коэффициент корреляции Пирсона между температурой и разностью частот PHMi − PHM 1 [45, 53].

Экспериментальный ТКЧ = (3,72 ± 0,08)×10⁻¹⁵/°C – в 2,7 раза лучше паспортного максимума [37]. Для PHM 3 коэффициент корреляции Пирсона r = 0,79 при нулевом P-значении подтверждает сильную линейную зависимость частоты от температуры [53]. Для стандартов PHM 1 и PHM 2, расположенных в климатической камере, коэффициент корреляции на порядок

меньше (r ≈ 0,079), что свидетельствует о высокой эффективности термостабилизации. Программная термокомпенсация (раздел 1.5.3) подавляет влияние температуры на 74 % в типичных условиях (ΔT = ± 3 °C) и более чем на 90 % при аномальных выбросах (ΔT > ± 5 °C).

1.5.3 Программная термокомпенсация

Для РНМ 3 (без климатической камеры) реализована программная термокомпенсация:

$$y_{comp}(t) = y_{raw}(t) - b \cdot \left[T(t) - T_{ref}\right] \tag{1.11}$$

где T_{ref} = 22 °C – опорная температура.

Для проверки постоянства температурной зависимости частоты запись разностей частот РНМ 3 − РНМ 1 была разделена на отрезки продолжительностью около одного месяца. На каждом отрезке методом линейной регрессии оценивался ТКЧ. Полученная динамика коэффициента на интервале наблюдения более двух лет не выявила явной тенденции к его изменению [53], что подтверждает правомерность применения единого коэффициента b = $3{,}72\times10^{-15}$/°C для программной термокомпенсации на всём интервале эксплуатации стандарта РНМ 3.

Дополнительно исследовалась температурная чувствительность стандартов, расположенных в климатической камере. Коэффициент корреляции Пирсона между температурой в помещении и разностью частот РНМ 2 − РНМ 1 составил ~0,079 при Р-значении $2{,}4\times10^{-9}$. Полученное значение на порядок меньше аналогичного коэффициента для РНМ 3 − РНМ 1, однако ненулевое Р-значение указывает на слабую, но статистически значимую связь. Вклад данного эффекта в суммарную неопределённость измерений составляет менее 0,15 % и на практике пренебрежимо мал [53].

Эффективность термокомпенсации определяется как:

$$\eta_T = (\sigma_{y(\text{без комп.})} - \sigma_{y(c\ \text{комп.})})/\sigma_{y(\text{без комп.})} \times 100\% \tag{1.12}$$

Для РНМ 3 при ΔT = ±3 °C: $\sigma_{y(\text{без комп.})} = 5{,}8\times10^{-15}$; $\sigma_{y(c\ \text{комп.})} = 1{,}5\times10^{-15}$; η_T = 74 %.

При аномальных температурных выбросах (ΔT > ± 5 °C) эффективность достигает > 90 % (см. раздел 2.9.2).

На рисунке 1.14 приведена динамика ТКЧ РНМ 3, оценённого методом линейной регрессии на скользящих месячных отрезках за февраль 2022 – декабрь 2023. Отсутствие

тенденции к изменению коэффициента подтверждает правомерность применения постоянного значения b = 3,72×10⁻¹⁵/°C на всём интервале эксплуатации.

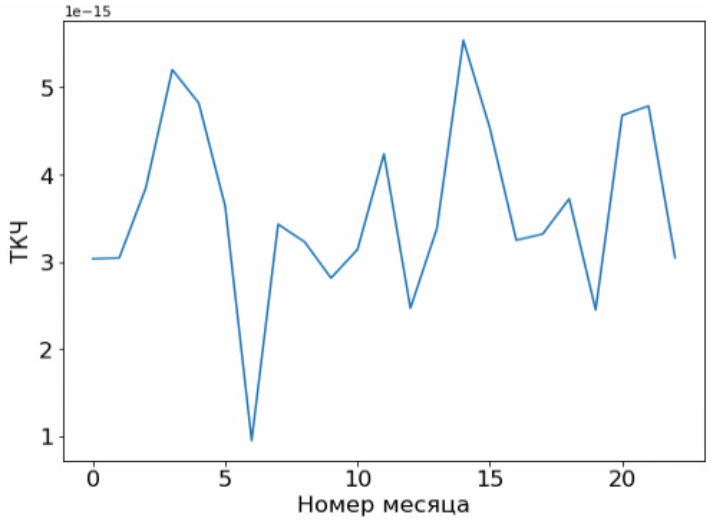


Рисунок 1.14 – Динамика температурного коэффициента частоты стандарта РНМ 3

На рисунке 1.15 представлено сравнение нестабильности разности частот РНМ 3 – РНМ 1 без термокомпенсации и с программной компенсацией (b = 3,72×10⁻¹⁵/°C), а также нестабильности РНМ 2 − РНМ 1 как ориентира. После применения компенсации характеристика РНМ 3 приближается к уровню стандарта, расположенного в климатической камере.

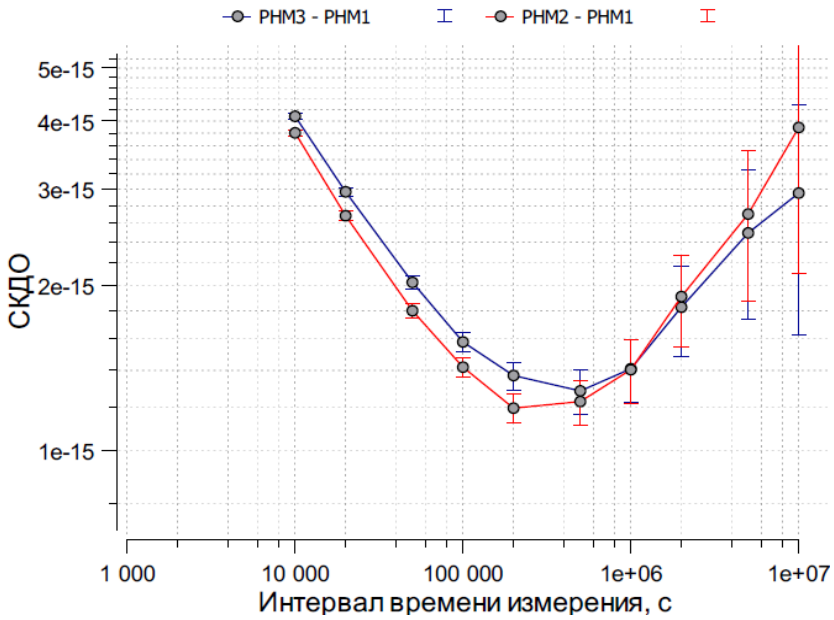


Рисунок 1.15 – Нестабильность РНМ 3 − РНМ 1 до и после термокомпенсации в сравнении с РНМ 2 − РНМ 1

1.6 Бюджет неопределённости

1.6.1 Источники неопределённости

Оценка неопределённости измерений проводится в соответствии с руководством GUM [42] и терминологией ГОСТ 8.567–2014 [82]. Различают неопределённость типа A (статистическая) и типа B (систематическая). Применительно к метрологии времени и частоты методология GUM адаптирована в работах [19, 66, 83], где рассмотрены специфические источники неопределённости в ГНСС-сравнениях и фазовых измерениях. Итоговый бюджет неопределённости представлен в таблице 1.11.

Таблица 1.11 – Бюджет неопределённости для измерений UTC − UTC(KZ)

Источник	Тип	Значение (нс)	u²(нс²)	Относ. вклад (%)
Внутренние источники:				
Компаратор VCH-315M	B	0,05	0,0025	0,06
Дискретность измерений	B	0,03	0,0009	0,02
Температурные вариации PHM1	A	0,08	0,0064	0,14
Внешние источники (ГНСС):				
Приёмник GTR55 (белый шум)	B	1,50	2,2500	51,0
Многолучёвость	A	0,80	0,6400	14,5
Ионосфера (остаточная)	A	0,60	0,3600	8,2
Тропосфера	B	0,40	0,1600	3,6
Эфемериды спутников	B	0,30	0,0900	2,0
Калибровка антенны	B	0,50	0,2500	5,7
Обработка данных:				
Численные методы	B	0,20	0,0400	0,9
Округление данных	B	0,10	0,0100	0,2
Интерполяция	B	0,15	0,0225	0,5
Прочие:				
Задержка в кабелях	B	0,20	0,0400	0,9
Релятивистские эффекты	B	0,05	0,0025	0,06
Нераспознанные систематики	B	0,30	0,0900	2,0
Суммарная стандартная (k=1)	-	**2,0 нс**	**4,025**	**100**
Расширенная (k=2, 95 %)	-	**4,0 нс**	-	-

Суммарная неопределённость рассчитывается по формуле:

$$u_c = \sqrt{\sum u_i^2} = \sqrt{4{,}025} = 2{,}01 \text{ нс} \tag{1.13}$$

Суммарная стандартная неопределённость измерений UTC − UTC(KZ) составляет uc ≈ 2,0–2,1 нс [42], что согласуется с неопределённостью UTCr [39]. Основной вклад дают ГНСС-измерения [19, 66]: белый шум приёмника (51 %), многолучёвость (14,5 %). Внутренние источники (компаратор, температура) дают лишь 0,2 %.

1.6.2 Верификация бюджета неопределённости

Для верификации полученного бюджета неопределённости выполнено сравнение с опубликованными оценками BIPM для UTCr [39] (таблица 1.12). Согласованность результатов (отклонение итоговых значений не превышает 0,1 нс) подтверждает корректность применённой методики [19, 42, 66] и свидетельствует об отсутствии неучтённых систематических составляющих.

Таблица 1.12 – Сравнение бюджетов неопределённости

Источник	UTC – UTC(KZ) (нс)	UTCr [39] (нс)	Комментарий
ГНСС-измерения	2,0	1,8	BIPM использует усреднение
Обработка данных	0,3	0,5	BIPM: сложная обработка
Систематики	0,5	0,8	BIPM: учёт > 50 лабораторий
Итого (k = 1)	2,1 нс	2,0 нс	Хорошее согласие

1.7 Выводы по Главе 1

Проведённое комплексное экспериментальное исследование трёх ПВСЧ VCH-1008 [37, 45], эксплуатируемых на ГЭВЧ РК [35] в течение более 3 лет (декабрь 2021 – декабрь 2024), позволило установить следующее.

1. **Долговременная нестабильность частоты.** Экспериментально установлено, что $\sigma_y(7\text{ сут}) = (1{,}0–1{,}3)\times10^{-15}$ [45, 47], что значительно превосходит паспортный норматив [37] и сопоставимо с характеристиками активных водородных стандартов предыдущего поколения [10, 11]. Минимум девиации Аллана достигается на интервале $\tau = 7$ суток, что обосновывает выбор недельного интервала управления по данным UTCr [17, 18]. Это подтверждает пригодность ПВСЧ для формирования национальных шкал времени в соответствии с требованиями BIPM [5].

2. **Температурный коэффициент частоты.** Экспериментально определённый ТКЧ = $(3{,}72 \pm 0{,}08)\times10^{-15}/°C$ – в 2,7 раза лучше паспортного максимума [37]. Программная термокомпенсация обеспечивает подавление температурного влияния на 74 % в типичных условиях ($\Delta T = \pm 3$ °C) и более чем на 90 % при аномальных вариациях $\Delta T > \pm 5$ °C. Анализ динамики ТКЧ на интервале более двух лет не выявил статистически значимой тенденции к его изменению [45, 53].

3. **Идентификация шумовых процессов.** Доминирующие типы шумов: белый частотный шум ($\tau < 1\,000$ с) и случайные блуждания частоты ($\tau > 10^5$ с) [45, 47]. Параметры шумов: $h_{-2} \approx 1{,}0\times10^{-25}$, $h_{-4} \approx 5\times10^{-36}$ (в единицах $S_y(f)$).

4. **Сравнение с аналогами.** Характеристики VCH-1008 сопоставимы с активными водородными мазерами 1990-х годов [10, 11] при стоимости в 5–8 раз ниже. По сравнению с

коммерческими цезиевыми стандартами, ПВСЧ обеспечивают в 5–10 раз лучшую долговременную нестабильность [12, 13]. Единственная другая шкала времени с участием пассивных стандартов – UTC(TL) (Тайвань) – демонстрирует σ_x = 1,50 нс при использовании конфигурации 3 Cs + 1 ПВСЧ с прямой коррекцией по UTC(PTB), что сопоставимо с UTC(KZ) (σ_x = 2,31 нс, см. главу 4).

Полученные результаты обосновывают переход к Главе 2, где разрабатывается алгоритм автоматического управления шкалой времени UTC(KZ) на основе установленных в настоящей главе характеристик стандартов.

Определённые экспериментальные параметры стохастической модели ведущего стандарта РНМ 1 (σ_1=1,1×10^{-12} с$^{1/2}$, σ_2=1,6×10^{-18} с$^{-1/2}$, что соответствует q_1=7,2×10^{-26} с и q_2=2,4×10^{-36} с$^{-1}$) используются в Главе 2 для расчёта оптимальных коэффициентов ПИ-регулятора и в Главе 3 для оценки неопределённости прогноза шкалы времени. Экспериментально измеренный дрейф частоты D ≈ 1,2×10^{-16}/сут и температурный коэффициент ТКЧ = (3,72 ± 0,08)×10^{-15}/°C определяют параметры блоков компенсации систематических погрешностей (разделы 2.9.1, 2.9.2).

Глава 2. Разработка алгоритма автоматической подстройки национальной шкалы времени

2.1 Постановка задачи управления

Настоящая глава посвящена разработке алгоритма автоматической подстройки национальной шкалы времени UTC(KZ) по данным Rapid UTC (UTCr) [16, 39]. Задача управления формулируется как минимизация отклонения UTC(KZ) от международного координированного времени UTC [84] при ограничениях на управляющие воздействия, обеспечивающих низкую нестабильность частоты выходного сигнала.

Объектом управления является вспомогательный синтезатор частоты VCH-317, формирующий выходные сигналы шкалы времени UTC(KZ) (1 Гц и 5 МГц) и стабилизированный по частоте относительно ведущего пассивного водородного стандарта PHM 1 (VCH-1008). Состав и характеристики эталонного комплекса подробно описаны в Главе 1 (раздел 1.1). Как показано в разделе 1.4.1, минимальная нестабильность частоты PHM 1 наблюдается на интервале $\tau = 7$ суток ($\sigma_y(7\text{ сут}) = 1{,}0\times10^{-15}$), что является физическим обоснованием выбора недельного интервала управления.

Коррекция частоты синтезатора VCH-317 производится дискретными шагами с разрешением не хуже 1×10^{-15} в относительных единицах. Опорным сигналом для управления служат еженедельные данные UTCr [16, 39], публикуемые BIPM с задержкой приблизительно 3–4 суток (описание публикаций BIPM – раздел 1.1.3).

В соответствии с техническими требованиями BIPM к национальным шкалам времени, участвующим в формировании TAI [5], а также руководящими документами CCTF, сформулированы следующие целевые показатели качества:

– среднеквадратическое отклонение (СКО) разности шкал UTC(KZ) − UTC: $\sigma_x < 3$ нс;

– максимальное по модулю отклонение: $|x|_{max} < 10$ нс;

– нестабильность частоты за 7 суток: $\sigma_y(7\text{ сут}) < 1{,}2\times10^{-15}$;

– полностью автоматический режим работы 24/7 без участия оператора.

Управление шкалой осуществляется еженедельно по четвергам в 08:00 UTC. Интервал управления $\Delta t = 7$ суток = 604 800 с определяется периодичностью публикации данных UTCr. Задержка в поступлении данных составляет в среднем около 3,5 суток. Физическая схема системы управления показана на рисунке 2.1.

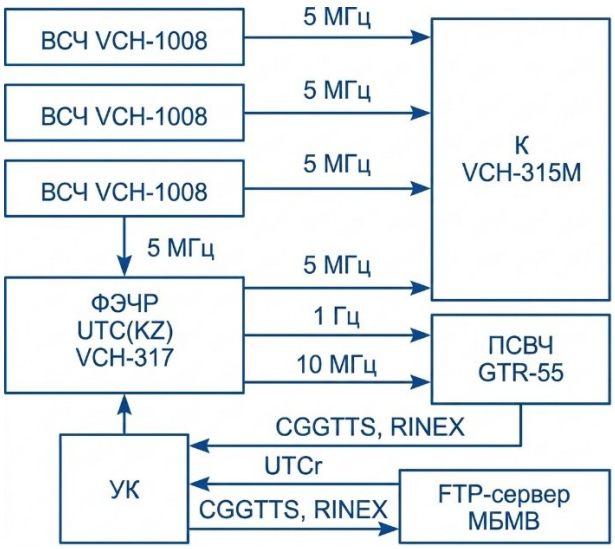


Рисунок 2.1 – Схема автоподстройки шкалы UTC(KZ) по данным UTCr:
ПВСЧ – пассивный водородный стандарт частоты VCH-1008;
К – многоканальный частотный компаратор VCH-315M;
ФЭЧР – формирователь эталонных частот резервируемый VCH-317;
ПСВЧ – приёмник сигналов времени и частоты глобальных навигационных спутниковых систем GTR55; УК – управляющий компьютер

Хронология режимов управления шкалой UTC(KZ) до и после внедрения алгоритма автоподстройки по данным UTCr подробно рассмотрена в разделе 2.8.1.

2.2 Математическая модель системы управления

Для описания поведения шкалы времени используется двумерная линейная дискретная модель [43, 85], предложенная в работе [86]. Вектор состояния содержит отклонение по фазе x_n и относительное отклонение частоты y_n:

$$\boldsymbol{X}_n = [x_n, y_n]^{\mathrm{T}} \tag{2.1}$$

где x_n = UTC(KZ) − UTC на момент n-го управления; $y_n = (x_n - x_{n-1})/\Delta t$ – оценка относительного отклонения частоты. Уравнение эволюции состояния без управляющего воздействия [43]:

$$\boldsymbol{X}_{n+1} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{X}_n + \boldsymbol{B}u_n + \boldsymbol{w}_n \tag{2.2}$$

где матрицы модели имеют вид:

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{B} = [\Delta t, 1]^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{H} = [1, 0] \tag{2.3}$$

u_n – управляющее воздействие (коррекция частоты в относительных единицах); w_n – вектор шума процесса с ковариационной матрицей Q_n. Уравнение измерений:

$$z_n = \boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{X}_n + v_n \tag{2.4}$$

где z_n – измеренное значение отклонения шкалы UTC(KZ) относительно UTC; v_n – шум измерений с дисперсией $R_n = q_0$.

2.2.1 Стохастическая модель шумов и связь с параметрами Главы 1

Параметры шумовых процессов q_0, q_1, q_2 задают ковариационные матрицы модели [43, 85, 87]:

$$\boldsymbol{Q}_n = \begin{bmatrix} q_1\Delta t + q_2(\Delta t)^3/3 & q_2(\Delta t)^2/2 \\ q_2(\Delta t)^2/2 & q_2\Delta t \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

где q_0 соответствует белому фазовому шуму (WPN), q_1 – белому частотному шуму (WFN), q_2 – шуму случайных блужданий частоты (RWFN). Связь параметров шума с характеристиками девиации Аллана $\sigma_y(\tau)$ [87, 88]:

$$\sigma^2_{\mathrm{WPN}}(\tau) = \frac{3q_0}{\tau^2}, \quad \sigma^2_{\mathrm{WFN}}(\tau) = \frac{q_1}{\tau}, \quad \sigma^2_{\mathrm{RWFN}}(\tau) = \frac{q_2\tau}{3} \tag{2.6}$$

Эти соотношения позволяют определить параметры модели непосредственно из экспериментальных данных, полученных в Главе 1 (разделы 1.2–1.4). Аппроксимация графиков $\sigma_y(\tau)$ для ведущего ПВСЧ РНМ 1, измеренных компаратором VCH-315M (рисунок 1.12), даёт следующие значения:

$$q_0 = 4{,}1 \times 10^{-26}\ \text{с}, \quad q_1 = 7{,}2 \times 10^{-26}\ \text{с}, \quad q_2 = 2{,}4 \times 10^{-36}\ \text{с}^{-1} \tag{2.7}$$

Эти значения согласуются с типами шумов, идентифицированными в разделе 1.4.2: при $\tau < 10^5$ с доминирует белый частотный шум (WFN, $\mu \approx -0{,}5$), при $\tau > 10^5$ с – случайные блуждания частоты (RWFN, $\mu \approx +0{,}5$). Следует отметить, что параметры (2.7) получены конкретно для экземпляра РНМ 1 эталонного комплекса ГЭВЧ РК и отличаются от значений, приведённых для аналогичного стандарта в [86] ($\sigma^2_\varepsilon \approx 8{,}6\times10^{-26}$, $s^2_\xi \approx 1{,}1\times10^{-25}$, $s^2_\eta \approx 2{,}3\times10^{-34}$), что обусловлено различием индивидуальных характеристик экземпляров ПВСЧ. Линейный суточный дрейф

РНМ 1, измеренный в разделе 1.3.3 (D ≈ 1,2×10⁻¹⁶/сут при скользящем окне 30 суток), дополнительно включён в модель как детерминированная составляющая.

Нестабильность опорного сигнала UTCr характеризуется параметрами [45]:

$$q_{0\mathrm{re}} = 8{,}0 \times 10^{-20},\ q_{1\mathrm{re}} = 8{,}5 \times 10^{-25} \tag{2.8}$$

Белый фазовый шум q_{0re} в модели опорного сигнала обусловлен погрешностью ГНСС-сравнения шкал на больших расстояниях (бюджет неопределённости – раздел 1.6). Белый частотный шум q_{1re} связан с периодическими скачками расчётной шкалы BIPM, наблюдаемыми в протоколах UTCr.

2.3 Теория линейно-квадратичного гауссовского управления атомными часами

Примечание. Общая теория ЛКГ-оптимального управления атомными часами и представление в форме пространства состояний заимствованы из работ [30, 31, 89–91]. Вклад автора настоящей диссертации состоит в:

(а) адаптации стохастической модели к экспериментальным параметрам пассивных водородных стандартов VCH-1008, определённым в Главе 1;

(б) разработке методики определения оптимальной постоянной времени T по критерию пересечения кривых нестабильности (раздел 2.4);

(в) компенсации специфических погрешностей – задержки данных UTCr (раздел 2.9.4), температурных вариаций (раздел 2.9.2), выбросов в данных UTCr (раздел 2.9.3);

(г) реализации и внедрении алгоритма на ГЭВЧ РК (раздел 2.6);

(д) экспериментальной валидации и сравнительном анализе (разделы 2.8, 2.10).

Задача подстройки шкалы времени к внешнему опорному сигналу формально относится к классу задач оптимального стохастического управления [92]. В данном разделе изложена теория линейно-квадратичного гауссовского (ЛКГ/LQG) управления применительно к рассматриваемой задаче, основанная на работах [43, 85]. Принцип разделения позволяет решать задачу оптимального управления как два независимых подпункта: оптимальное оценивание состояния (фильтр Калмана) и оптимальное регулирование (ЛКР).

2.3.1 Линейно-квадратичный регулятор

Закон управления формулируется как пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор [43, 85, 86]:

$$u_n = -\boldsymbol{G} \cdot \hat{\boldsymbol{X}}_n = -g_x \hat{x}_n - g_y \hat{y}_n \quad (2.9)$$

где G = [g_x, g_y] – вектор коэффициентов управления; $\hat{x}_n$, $\hat{y}_n$ – оценки отклонения по фазе и частоте на n-й момент управления. Система (2.2) с законом управления (2.9) описывается матрицей замкнутого контура:

$$\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{F} - \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} 1 - g_x \cdot \Delta t & (1 - g_y) \cdot \Delta t \\ -g_x & 1 - g_y \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Система устойчива, $|z_{1,2}| < 1$, при выполнении условий [88]:

$$g_x \Delta t > 0,\ g_y > 0,\ g_y < 2 - \frac{g_x \Delta t}{2}. \quad (2.11)$$

Область устойчивости (2.11) на плоскости параметров ($g_x \cdot \Delta t$, g_y) разбивается на области с различным характером переходного процесса (таблица 2.1). Граница между областями D1 и D2 соответствует критическому демпфированию, при котором собственные значения Ф вещественны и равны: $z_1 = z_2 = (1-g_y)^{1/2}$.

Таблица 2.1 – Области устойчивости системы автоподстройки [43]

Область	**Re($z_{1,2}$)**	**Im($z_{1,2}$)**
D1	Re $z_{1,2} > 0$	Im $z_{1,2} = 0$ (апериодический)
D2	Re $z_{1,2} > 0$	Im $z_{1,2} \neq 0$ (колебательный затухающий)
D3	Re $z_{1,2} < 0$	Im $z_{1,2} \neq 0$
D4	Re $z_{1,2} < 0$	Im $z_{1,2} = 0$
D5	Re $z_1 \cdot$ Re $z_2 < 0$	Im $z_{1,2} = 0$ (знакочередующийся)

2.3.2 Постоянная времени контура управления

Ключевым практическим параметром системы управления является постоянная времени *T*, определяемая как время экспоненциального затухания [88]:

$$T = -\frac{\Delta t}{\ln(\max|z_{1,2}|)} \tag{2.12}$$

Для области D2 (комплексные полюса) $|z_{1,2}| = \sqrt{1-g_y}$, откуда:

$$T = -\frac{2\Delta t}{\ln(1-g_y)} \tag{2.13}$$

При заданной постоянной времени T коэффициент g_y находится из (2.13):

$$g_y = 1 - e^{-\frac{2\Delta t}{T}} \approx \frac{2\Delta t}{T} \quad (\text{при } \Delta t \ll T). \tag{2.14}$$

Для случая критического демпфирования (граница D1/D2) коэффициент g_x:

$$g_x = \frac{1}{\Delta t}\left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right)^2 \approx \frac{\Delta t}{T^2} \quad (\text{при } \Delta t \ll T). \tag{2.15}$$

В частном случае $g_y = 1$ (ЛКР без ограничения на управляющие воздействия, $W_R = 0$):

$$g_x = \frac{1}{\Delta t}\left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right) \approx \frac{1}{T} \quad (\text{при } \Delta t \ll T). \tag{2.16}$$

Формулы (2.14)–(2.16) – приближения, справедливые при $\Delta t \ll T$. При $\Delta t/T = 0{,}70$ (реализованный режим) их точность существенно снижается (см. раздел 2.5), поэтому для расчёта параметров использованы точные выражения.

Помимо описания в пространстве состояний, контур управления может быть охарактеризован передаточными функциями в Z-области [43]. Передаточная функция разомкнутого контура определяется из структурной диаграммы, соответствующей системе (2.10):

$$W_{\text{разом}}(z) = \frac{g_x \cdot \Delta t \cdot z + (g_y - g_x) \cdot \Delta t}{(z-1)^2} \tag{2.17}$$

а передаточная функция замкнутого контура:

$$W_{\text{замк}}(z) = \frac{W_{\text{разом}}(z)}{1 + W_{\text{разом}}(z)} \tag{2.18}$$

Частотный отклик контура управления получается подстановкой z = exp(j2πfΔt) в $W_{\text{замк}}$(z). Эффективная полоса пропускания контура обратно пропорциональна постоянной времени: $f_C \approx 1/(2\pi T)$ [43]. Двойной полюс в $(z-1)^2$ обеспечивает астатизм второго порядка: система отслеживает линейно-нарастающую фазу (постоянное смещение частоты) без статической ошибки по частоте, что является фундаментальным свойством ПИ-регулятора (2.9). Частотный анализ передаточной функции замкнутого контура лежит в основе метода определения оптимальной постоянной времени (раздел 2.4).

2.3.3 Фильтр Калмана для оценки фазы и частоты

Для оптимальной оценки вектора состояния X_n (отклонений фазы и частоты) по зашумлённым измерениям z_n используется линейный фильтр Калмана [86, 89]. Рекуррентная формула оценки:

$$\widehat{\boldsymbol{X}}_{n+1} = \boldsymbol{F}\widehat{\boldsymbol{X}}_n + \boldsymbol{B}u_n + \boldsymbol{K}_{n+1}\left[\boldsymbol{z}_{n+1} - \boldsymbol{H}\left(\boldsymbol{F}\widehat{\boldsymbol{X}}_n + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{n}}\right)\right], \tag{2.19}$$

где K_n – матрица усиления Калмана, вычисляемая итерационно:

$$\bar{\boldsymbol{P}}_{n+1} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{P}_n \cdot \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_n \tag{2.20}$$

$$\boldsymbol{K}_{n+1} = \bar{\boldsymbol{P}}_{n+1} \cdot \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} \cdot \left(\boldsymbol{H} \cdot \bar{\boldsymbol{P}}_{n+1} \cdot \boldsymbol{H}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}_n\right)^{-1} \tag{2.21}$$

$$\boldsymbol{P}_{n+1} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_{n+1} \cdot \boldsymbol{H}) \cdot \bar{\boldsymbol{P}}_{n+1} \tag{2.22}$$

Важно отметить, что в алгоритме Мишагина–Медведева [85], разработанном для подстройки активного водородного стандарта VCH-1003A к UTC(SU) с суточным интервалом управления, фильтр Калмана применялся в полном виде для совместного оценивания фазы и частоты по данным кодовых ГНСС-измерений с задержкой 12 ч. В реализованном алгоритме UTC(KZ) фильтр Калмана заменён линейной экстраполяцией МНК (раздел 2.6), что обусловлено недельным интервалом управления и доступностью 7 точек протокола UTCr для аппроксимации. Как показано в разделе 2.7.3, оба подхода обеспечивают практически идентичные показатели σ_x и σ_u.

В установившемся режиме $K_n \rightarrow K=const$, и фильтр Калмана приобретает фиксированную структуру (стационарный фильтр). Это свойство использовано при параметрическом анализе в разделе 2.4.

2.3.4 Минимизация функционала

ЛКР минимизирует функционал качества – взвешенную сумму квадратов отклонений по фазе, частоте и управляющих воздействий [43]:

$$J = \sum_n \left(X_n^T W_Q X_n + u_n^T W_R u_n \right) \rightarrow \min, \tag{2.23}$$

где весовые матрицы имеют вид:

$$W_Q = q \begin{bmatrix} p & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad W_R = r \tag{2.24}$$

Коэффициент p задаёт соотношение штрафа за ошибку по фазе и по частоте; r ограничивает величину управляющих воздействий; q–масштабный коэффициент (рекомендуется q = 0,001 [43]). При r = 0 получаем $g_y = 1$, $g_x = 1/T$ (частный случай, формула (2.16)). Коэффициенты управления $G = [g_x, g_y]$ находятся из уравнения Риккати:

$$\boldsymbol{G} = \left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{\Gamma} \cdot \boldsymbol{B} + \boldsymbol{W}_R \right)^{-1} \cdot \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{\Gamma} \cdot \boldsymbol{F} \tag{2.25}$$

$$\boldsymbol{\Gamma} = \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{\Gamma} \cdot \boldsymbol{F} - \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{\Gamma} \cdot \boldsymbol{B} \cdot \left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{\Gamma} \cdot \boldsymbol{B} + \boldsymbol{W}_R \right)^{-1} \cdot \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{\Gamma} \cdot \boldsymbol{F} + \boldsymbol{W}_Q \tag{2.26}$$

Аппроксимация зависимости весового коэффициента r от постоянной времени T и интервала управления Δt [43]:

$$\frac{r}{p \cdot q} \approx \alpha \cdot T^{\beta} \cdot (\Delta t)^{\gamma} \tag{2.27}$$

где коэффициенты α, β, γ определены численно методом наименьших квадратов:

$$\alpha = 0{,}25, \ \beta = 4, \ \gamma = -2 \tag{2.28}$$

Формула (2.27)–(2.28) позволяет вычислить r непосредственно для заданных T, Δt, p, q без численного моделирования, что существенно упрощает практическое применение ЛКГ-метода.

2.3.5 Статические ошибки в установившемся режиме

Рассматриваемая система характеризуется астатизмом второго порядка по фазе и первого порядка по частоте [43, 85]: при линейном дрейфе частоты D статическая ошибка по частоте равна нулю, а статическая ошибка по фазе пропорциональна дрейфу. Это свойство непосредственно следует из двойного полюса в $(z-1)^2$ передаточной функции разомкнутого контура (раздел 2.3.2). Используя теорему о предельном значении Z-преобразования [85]:

$$x_{\text{ст}} = D\Delta t_{\text{упр}} / g_x \tag{2.29}$$

При экспериментально измеренном суточном дрейфе РНМ 1 (раздел 1.3.3) D = $1{,}2\times10^{-16}$/сут и $g_x = 4{,}2\times10^{-7}$ с$^{-1}$ (раздел 2.5) получаем $x_{\text{ст}} = D\Delta t_{\text{упр}}/g_x = 1{,}2\times10^{-16} \times 7 / 4{,}2\times10^{-7} =$ 2,0 нс, сопоставимо с целевым $\sigma_x < 3$ нс и определяет нижний предел погрешности слежения. Однако, как показано в разделе 1.3.4, автоматическая компенсация дрейфа ($\eta = 69$ % для РНМ 1) снижает $x_{\text{ст,комп}}$ до 0,2–0,6 нс.

СКО ошибки по фазе σ_x, ошибки по частоте σ_y и коррекций частоты σ_u в установившемся режиме ЛКГ-управления оцениваются из уравнений Ляпунова [85, 90]:

$$\left.\begin{aligned} \Sigma_{\Delta X} &= A(I-KH)\Sigma_{\Delta X}[A(I-KH)]^{\text{T}} + AKRK^{\text{T}}A^{\text{T}} + Q, \\ \Sigma_X &= A\Sigma_X A^{\text{T}} + KH\Sigma_{\Delta X}H^{\text{T}}K^{\text{T}} + KRK^{\text{T}}, \quad A = F - BG, \end{aligned}\right\} \tag{2.30), (2.31}$$

$$\sigma_u = \sqrt{G\Sigma_X G^{\text{T}}} \tag{2.32}$$

Формулы (2.30)–(2.32) использованы для теоретической оценки характеристик системы управления UTC(KZ) в разделе 2.7.

2.4 Метод определения оптимальной постоянной времени

Ключевым параметром алгоритма является постоянная времени T, определяющая характер переходного процесса и установившуюся нестабильность частоты подстраиваемой шкалы. Согласно рекомендации [43], постоянная времени контура должна быть приблизительно равна интервалу усреднения τ_X, при котором графики нестабильности частоты свободного генератора и опорного сигнала пересекаются:

$$T = \alpha_X \cdot \tau_X, \quad 0{,}1 < \alpha_X < 1 \tag{2.33}$$

2.4.1 Связь интервала усреднения с частотными характеристиками

Физическое обоснование выбора T ~ τ_X следует из частотного анализа [43]: полоса пропускания контура управления $f_C \approx 1/(2\pi T)$ должна совпадать с частотой пересечения спектральных плотностей мощности $\sigma_y(f)$ свободного генератора и опорного сигнала (рисунок 2.2). Для различных сочетаний типов шумов получены аналитические соотношения между τ_X и f_X (таблица 2.2) [43]:

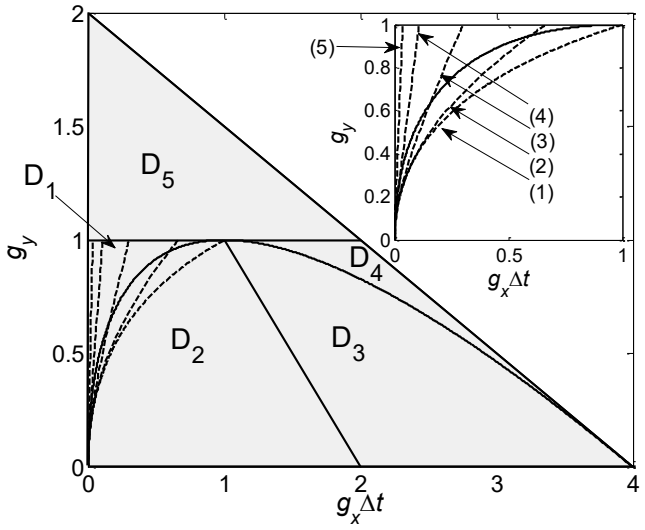


Рисунок 2.2 – Идеализированная комбинация спектров мощности: полоса пропускания f_C контура управления совпадает с f_X [43]

Таблица 2.2 – Соотношение между частотой пересечения f_X и интервалом усреднения τ_X для различных сочетаний шумов [43]

Шум опорного $S_y(f)$	**Шум генератора $S_y(f)$**	**fx**
h_2f^2 (WPN)	$h_{-2}f^{-2}$ (RWFN)	$f_X = (\sqrt{3}/2\pi)\cdot\tau_X^{-1}$
h_2f^2 (WPN)	$h_{-1}f^{-1}$ (FFN)	$f_X = (3f_h/2\ln 2)^{1/3}\cdot(2\pi\tau_X)^{-2/3}$
h_0 (WFN)	$h_{-2}f^{-2}$ (RWFN)	$f_X = (\sqrt{3}/2\pi)\cdot\tau_X^{-1}$
h_0 (WFN)	$h_{-1}f^{-1}$ (FFN)	$f_X = (1/4\ln 2)\cdot\tau_X^{-1}$

Для комбинации WFN опорного (q_{1re}) и RWFN свободного генератора (q_2): $f_X = (\sqrt{3}/2\pi)\cdot\tau_X^{-1}$, что соответствует соотношению T ≈ τ_X при $\alpha_X = 1$. Результаты численного моделирования [43] показывают, что оптимальные значения α_X лежат в диапазоне 0,3–1,0 в зависимости от типа шума опорного сигнала: для WPN-опорного $\alpha_{Xopt} \approx 0{,}3$; для WFN-опорного $\alpha_{Xopt} \approx 0{,}7$–$1{,}0$. Параметр α_X является единственным свободным параметром при использовании метода ПИ-регулятора. Сводное сравнение методов управления шкалой атомного времени приведено в таблице 2.7.

2.4.2 Критерий качества нестабильности частоты

Для количественного сравнения различных постоянных времени T предложен безразмерный критерий качества нестабильности [43]:

$$Q_\sigma = \sum_n \frac{\sigma_y(\tau_n)}{\min\{\sigma_{\text{free}}(\tau_n), \sigma_{\text{ref}}(\tau_n)\}} \tag{2.34}$$

где σ_{free} – девиация Аллана свободного генератора, σ_{ref} – опорного сигнала, σ_y – подстраиваемой шкалы. Суммирование ведётся по интервалам τ_n от 10^3 с до 3×10^7 с. Наилучшей постоянной времени соответствует минимум $Q_\sigma(\alpha_X)$. Из численного моделирования [43]: $Q_{\sigma,min} = 0{,}7–0{,}9$ достигается при $\alpha_X \in (0{,}3;\ 1{,}0)$. При увеличении T нестабильность частоты подстраиваемой шкалы улучшается, однако одновременно возрастает погрешность слежения по фазе (формула (2.29)), поэтому выбор T является компромиссом.

Теоретическое обоснование критерия (2.34) следует из анализа передаточной функции замкнутого контура (раздел 2.3.2). Нестабильность частоты подстраиваемой шкалы на выходе контура управления может быть аналитически оценена через передаточную функцию $W_{замк}(z)$ и спектральную плотность мощности входного сигнала $S_{вх}(f)$ [43]:

$$\sigma_y^2(\tau) = \int \left|W_{\text{замк}}\left(e^{j2\pi f \Delta t}\right)\right|^2 \cdot S_{\text{вх}}(f) \cdot |H_{\text{AVAR}}(f|\tau)|^2 \, \mathrm{d}f \tag{2.35}$$

где $H_{AVAR}(f, \tau) = 2\sin^2(\pi f\tau)/(\pi f\tau)$ – передаточная функция оценки девиации Аллана [88]. Данная формула устанавливает прямую аналитическую связь между параметрами контура (g_x, g_y) и нестабильностью частоты выходного сигнала и является теоретическим обоснованием критерия $Q\sigma$ (2.34). Максимум ADEV подстраиваемого сигнала наблюдается при интервале усреднения $\tau \approx T$ [43], что подтверждает целесообразность размещения постоянной времени вблизи точки пересечения τ_X.

2.4.3 Экспериментальное определение интервала усреднения для UTC(KZ)

На рисунке 2.3 показаны измеренные параболические девиации сигналов, участвующих в управлении шкалой UTC(KZ) [45]. Параболическая девиация $\sigma_П(\tau)$ [75] предпочтительнее девиации Аллана для оценки нестабильности при наличии дрейфа частоты (раздел 1.2.2).

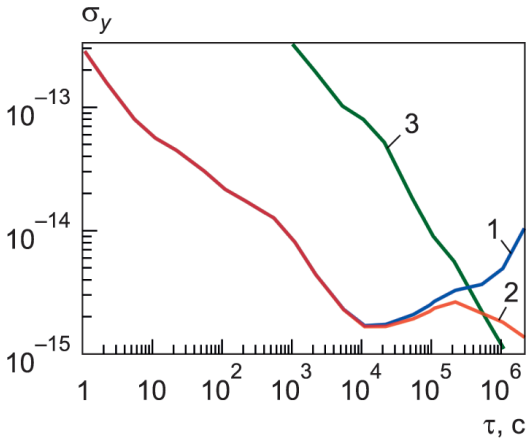


Рисунок 2.3 – Измеренная параболическая девиация (нестабильность $\sigma_П$) сигналов UTC(KZ): σ_1 – нестабильность частоты ведущего ПВСЧ РНМ 1 по данным компаратора; σ_2 – нестабильность частоты ведущего ПВСЧ относительно UTC по данным UTCr; σ_3 – нестабильность частоты UTC по данным UTCr; σ_4 – нестабильность частоты UTC(KZ) по данным UTCr [45]

Нестабильность σ_3 частоты UTC по данным UTCr вычисляется по формуле [45]:

$$\sigma_3(\tau) = \frac{1}{2} \cdot \mathrm{PDEV}\,[\mathrm{UTCr}(t+\tau) - \mathrm{UTCr}(t)] \tag{2.36}$$

Пересечение кривых σ_1 и σ_3 на рисунке 2.3 наблюдается при $\tau_X \approx 10^6$ с ≈ 12 суток (подтверждено анализом двухлетних данных). На интервалах $\tau < \tau_X$ нестабильность шкалы UTC(KZ) определяется характеристиками РНМ 1 (кривая σ_1); при $\tau > \tau_X$ – качеством опорного сигнала UTCr (кривая σ_3). Это разграничение соответствует принципу оптимального управления [43]: для $\tau < T$ следует использовать собственные характеристики генератора, для $\tau > T$ – прослеживаемость к UTC через UTCr.

Совпадение кривых σ_1 и σ_2 на длительных интервалах подтверждает корректность оценки нестабильности РНМ 1 по данным UTCr. На коротких интервалах погрешность UTCr (обусловленная неточностью ГНСС-сличений на больших расстояниях) значительно превышает погрешность компаратора VCH-315M (раздел 1.6.1).

2.5 Расчёт параметров системы управления

На основе экспериментальных данных (раздел 2.4.3) и методики [43] выполнен расчёт параметров системы автоподстройки UTC(KZ). При старте системы в мае 2022 г. на основе четырёхмесячного накопления данных (предварительная оценка $\tau_X \approx 10$ сут) выбрана постоянная времени $T = 10$ сут при $\alpha_X = 0{,}83$:

$$T = 10 \text{ сут} = 864\,000 \text{ с}, \;\; \Delta t = 7 \text{ сут} = 604\,800 \text{ с}, \;\; \frac{\Delta t}{T} = 0{,}70 \tag{2.37}$$

Коэффициенты управления рассчитаны по точным формулам критического демпфирования (2.14), (2.15) для T = 10 сут, Δt = 7 сут:

$$g_x = \frac{1}{\Delta t} \cdot \left(1 - e^{-\Delta t/T}\right)^2 = 4{,}2 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} \tag{2.38}$$

$$g_y = 1 - e^{-2\Delta t/T} = 1 - e^{-1{,}4} = 0{,}75 \tag{2.39}$$

Эти значения соответствуют опубликованным результатам [45, 55] и соответствуют режиму критического демпфирования (область D1/D2, таблица 2.1). Для сравнения, приближённые формулы (2.14)–(2.15), справедливые при Δt ≪ T, дают:

$$g_x \approx \frac{\Delta t}{T^2} = \frac{604800}{864000^2} = 8{,}1 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1} \tag{2.40}$$

$$g_y \approx \frac{2\Delta t}{T} = 2 \cdot 0{,}7 = 1{,}4 \tag{2.41}$$

Относительное отклонение приближённых формул от точных значений составляет 93 % для g_x и 86 % для g_y, что обусловлено большим отношением Δt/T = 0,70. Таким образом, для реализованных параметров системы UTC(KZ) использование приближённых формул недопустимо; расчёт выполнен по точным выражениям (2.38)–(2.39).

Следует подчеркнуть, что при старте системы в мае 2022 г. расчёт параметров выполнялся на основе четырёхмесячных измерительных данных; уточнённое значение $\tau_X \approx 12$ сут получено по двухлетнему массиву [45]. Тем не менее выбранная постоянная времени T=10 сут ($\alpha_X = 0{,}83$) оказалась близкой к оптимальной: численное моделирование при T=12 сут показало незначительное улучшение нестабильности частоты при одновременном увеличении погрешности по фазе, что подтверждает правомерность выбора T=10 сут [45].

Для ЛКГ-метода с ограничением на управляющие воздействия (r > 0) необходимое значение r вычисляется из (2.27):

$$r = p \cdot q \cdot \alpha \cdot T^{\beta} \cdot (\Delta t)^{\gamma} = p \cdot q \cdot 0{,}25 \cdot (864000)^4 \cdot (604800)^{-2} \tag{2.42}$$

При p = 1/(T²) = 1,34×10⁻¹² с⁻², q = 0,001 получаем r ≈ 5,4×10⁻²⁵. Для каждого значения r решается уравнение Риккати (2.26) численно и вычисляются коэффициенты *G* из (2.25).

Сравнение трёх методов расчёта – $g_y = 1$, критическое демпфирование и полный ЛКГ – представлено в разделе 2.9.

2.6 Алгоритм оценки фазы и частоты без фильтра Калмана

2.6.1 Мотивация и описание метода

В реализованном алгоритме UTC(KZ) вместо классического фильтра Калмана (раздел 2.3.3) применяется линейная экстраполяция данных UTCr методом наименьших квадратов с учётом предыдущего управляющего воздействия [45, 55]. Этот выбор обусловлен двумя соображениями: во-первых, простотой реализации – алгоритм МНК не требует хранения и обновления ковариационных матриц фильтра Калмана; во-вторых, эффективностью – как показано в разделе 2.7.3, метод достигает практически тех же показателей точности, что и фильтр Калмана, при обработке 7 точек протокола UTCr.

Алгоритм реализован следующим образом. Файл UTCr содержит 7 суточных значений UTC(KZ) − UTC за предыдущую неделю (с понедельника по воскресенье, 00:00 UTC). Файл публикуется в среду вечером, управление вводится в четверг в 08:00 UTC – промежуток около 3,5 суток.

2.6.2 Компенсация предыдущего управляющего воздействия

Каждая точка протокола UTCr, относящаяся к периоду после предыдущей коррекции u_{n-1}, смещается на значение, соответствующее накопленному сдвигу фазы за счёт этой коррекции (рисунок 2.4) [45]:

$$x'(t_i) = x(t_i) - u_{n-1} \cdot \left(t_i - t_{\text{упр}}(n-1)\right), \quad t_i > t_{\text{упр}}(n-1) \tag{2.43}$$

Алгоритм экстраполяции иллюстрируется рисунком 2.4: точки наблюдений с датами MJD 61100–61132 смещены вниз относительно исходных данных на величину $u_{упр} \cdot (t_{упр} - t_n)$, где $u_{упр}$ – коррекция частоты в относительных единицах, $t_{упр}$ – момент времени коррекции, t_n – моменты времени начала соответствующих суток [45]. Такая процедура позволяет включить в МНК-аппроксимацию точки до и после предыдущей коррекции и получить более достоверную оценку отклонения фазы и частоты на следующий момент управления.

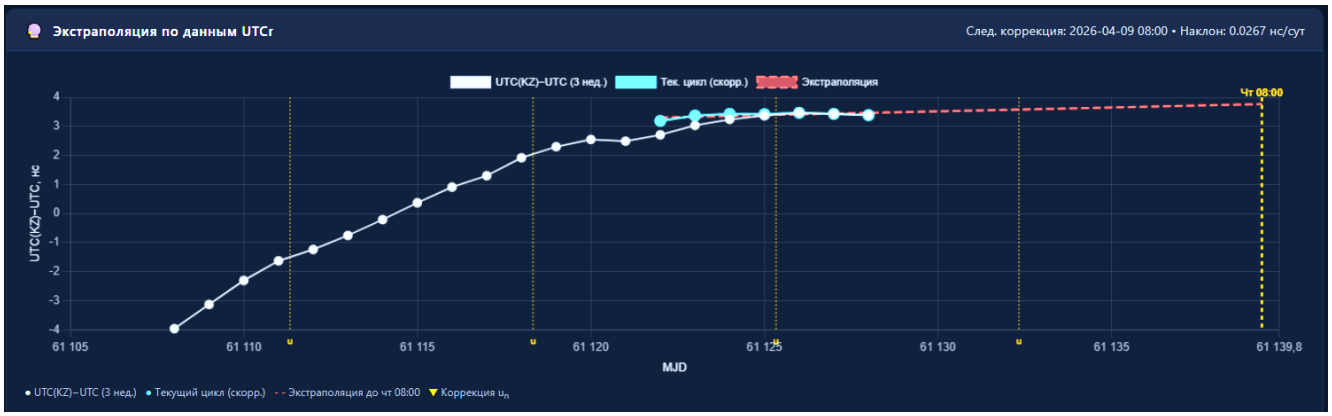


Рисунок 2.4 – Экстраполяция по данным UTCr с учётом предыдущего управления: 1 – исходные данные; 2 – вспомогательный график; 3 – линейная экстраполяция

2.6.3 Линейная аппроксимация и экстраполяция

По скорректированным 7 точкам $x'(t_i)$ методом наименьших квадратов строится линейная аппроксимация:

$$x'(t) = \hat{x}_{\text{last}} + \hat{y}_{\text{last}} \cdot (t - t_{\text{last}}) \tag{2.44}$$

где $\hat{x}_{\text{last}}$, $\hat{y}_{\text{last}}$ – МНК-оценки фазы и частоты на момент последней точки протокола (воскресенье, t_{last}). Экстраполяция на момент управления $t_{\text{упр}}$ (четверг 08:00):

$$\hat{x}_n = \hat{x}_{\text{last}} + \hat{y}_{\text{last}} \cdot \left(t_{\text{упр}} - t_{\text{last}}\right) \tag{2.45}$$

$$\hat{y}_n = \hat{y}_{\text{last}} \tag{2.46}$$

Неопределённость экстраполяции определяется нестабильностью частоты РНМ 1 за интервал ~3,5 суток и составляет $\sigma_{\text{экс}} \approx q_1^{1/2} \cdot \Delta t_{\text{экс}}^{1/2} \approx 0{,}32$ нс, что значительно меньше случайной погрешности данных UTCr (~1,5–2 нс по результатам раздела 1.6).

2.7 Численное моделирование процесса управления

2.7.1 Модель и параметры

Для проверки корректности выбранных параметров и прогнозирования характеристик системы проведено численное моделирование. Стохастическая модель ПВСЧ учитывает белый фазовый шум, белый частотный шум, случайные блуждания частоты и линейный дрейф [43, 45, 85].

Параметры модели ПВСЧ РНМ 1 (из раздела 2.2.1): $q_0=4{,}1\times10^{-26}$, $q_1=7{,}2\times10^{-26}$, $q_2=2{,}4\times10^{-36}$, $D = 1{,}8\times10^{-16}$/сут. Значение $D = 1{,}8\times10^{-16}$/сут выбрано как консервативная оценка для наихудшего стандарта (РНМ 3, таблица 1.7); для ведущего РНМ 1 экспериментальный дрейф $D = 1{,}2\times10^{-16}$/сут (раздел 2.2.1).

Параметры модели опорного сигнала UTCr (формула (2.8)): $q_{0re}=8{,}0\times10^{-20}$, $q_{1re}=8{,}5\times10^{-25}$.

Алгоритм управления в модели идентичен экспериментальному: еженедельное управление в четверг с линейной экстраполяцией на 3,5 суток вперёд и компенсацией предыдущего управляющего воздействия. Число независимых реализаций M = 1000, длина каждой – 730 суток (2 года).

Исходный код модели опубликован в открытом доступе [93].

2.7.2 Сравнение результатов моделирования нестабильности частоты

На рисунке 2.5, б представлены результаты моделирования нестабильности частоты UTC(KZ) для двух вариантов: с линейной экстраполяцией (основной алгоритм) и без (использование последнего доступного значения UTCr без экстраполяции на момент управления). Из рисунка 2.5, б следует [45]:

– применение экстраполяции снижает СКО коррекций частоты σ_u приблизительно на 14 %;

– погрешность слежения по фазе σ_x при этом увеличивается всего на 3–4 %;

– максимум кривой σ_4 (пунктир на рисунке 2.5, б, без экстраполяции) смещён вправо и расположен ниже, что свидетельствует о более плавном, но менее точном управлении.

Таким образом, линейный прогноз обеспечивает приемлемый компромисс. Дополнительно проведено сравнение с полным ЛКГ-алгоритмом (фильтр Калмана + усреднение 7 суточных оценок частоты): показатели σ_x и σ_u оказались практически идентичными, что подтверждает достаточность упрощённого метода МНК [45].

2.7.3 Результаты моделирования

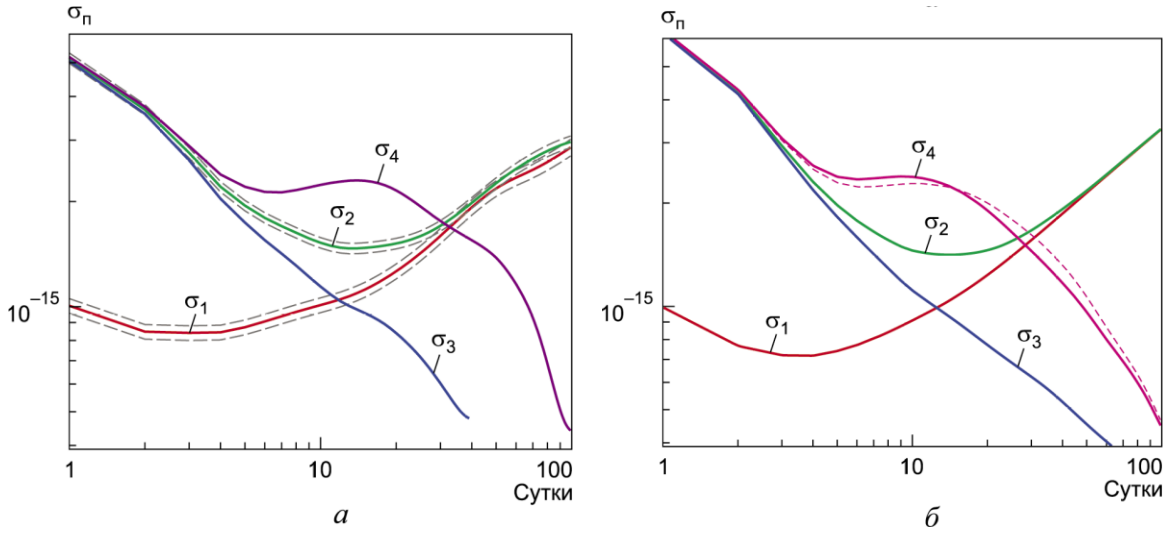


Рисунок 2.5 – Измеренная параболическая девиация частотных флуктуаций (нестабильность частоты $\sigma_п$) сигналов, участвующих в формировании и автоподстройке шкалы UTC(KZ) (а), и аналогичные оценки, рассчитанные в результате численного моделирования процесса автоподстройки UTC(KZ) (б): σ_1, σ_2 – нестабильность частоты ведущего ПВСЧ соответственно по данным компаратора и относительно UTC по данным UTCr; σ_3 – нестабильность частоты UTC по данным UTCr; σ_4 – нестабильность частоты UTC(KZ) по данным UTCr; пунктирные линии на рис. а, б – соответственно погрешность оценки нестабильности частоты и результат подстройки при оценке фазы без экстраполяции на момент управления

Количественное сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных приведено в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Сравнение результатов моделирования и эксперимента [45]

Параметр	**Моделирование**	**Эксперимент**
СКО по фазе σ_x, нс	≈ 2,0–2,2	2,5
Макс. отклонение $\lvert x\rvert_{max}$, нс	≈ 8,7	8,9
$\sigma_y(7\ сут) \times 10^{-15}$	–	≈ 1,1
СКО коррекций $\sigma_u \times 10^{-15}$	≈ 2,5	2,3

Примечание – Значение $\sigma_y(7\ сут)$ в моделировании не определялось, так как параболическая девиация на интервале 7 суток зависит от конкретной реализации шумового процесса и требует усреднения по значительно большему числу реализаций.

Расхождение между моделированием и экспериментом по σ_x (~20 %) обусловлено факторами, не учитываемыми в модели: ионосферными вариациями суточного характера в данных ГНСС-сличений, многолучёвостью, электромагнитными помехами, а также скачками расчётной шкалы BIPM в протоколах UTCr (наиболее значительный – 10 апреля 2023 г., MJD 60044). Тем не менее оба целевых показателя качества – $\sigma_x < 3$ нс и $\lvert x\rvert_{max} < 10$ нс – выполнены с запасом.

2.8 Экспериментальные результаты работы системы

2.8.1 История управления и начальный период

До ввода в эксплуатацию алгоритма автоподстройки по данным UTCr шкала UTC(KZ) последовательно проходила несколько режимов управления [55]. В таблице 2.4 представлена хронология периодов управления с января по май 2022 г. На рисунке 2.6 представлено отклонение шкалы UTC(KZ) относительно UTC для различных периодов управления. Динамика коррекций частоты и суммарного сдвига фазы показана на рисунке 2.7.

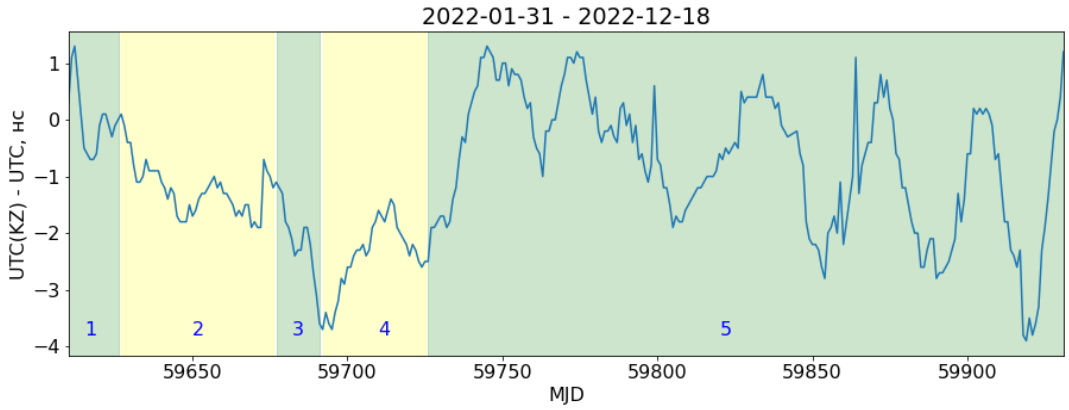


Рисунок 2.6 – Отклонение шкалы UTC(KZ) относительно UTC, различные периоды управления отмечены цифрами

Таблица 2.4 – Периоды управления шкалой UTC(KZ) [55]

№	Описание режима	Даты
1	Автоподстройка по UTC(SU). Δt = 1 сут, T = 5 сут	до 17.02.2022
2	Отсутствие коррекций (потеря UTC(SU))	17.02.2022–08.04.2022
3	Ручная коррекция	09.04.2022–22.04.2022
4	Отсутствие коррекций	23.04.2022–26.05.2022
5	Автоподстройка по UTCr. Δt = 7 сут, T = 10 сут ($g_x = 4{,}2\times10^{-7}$, $g_y = 0{,}75$)	с 26.05.2022

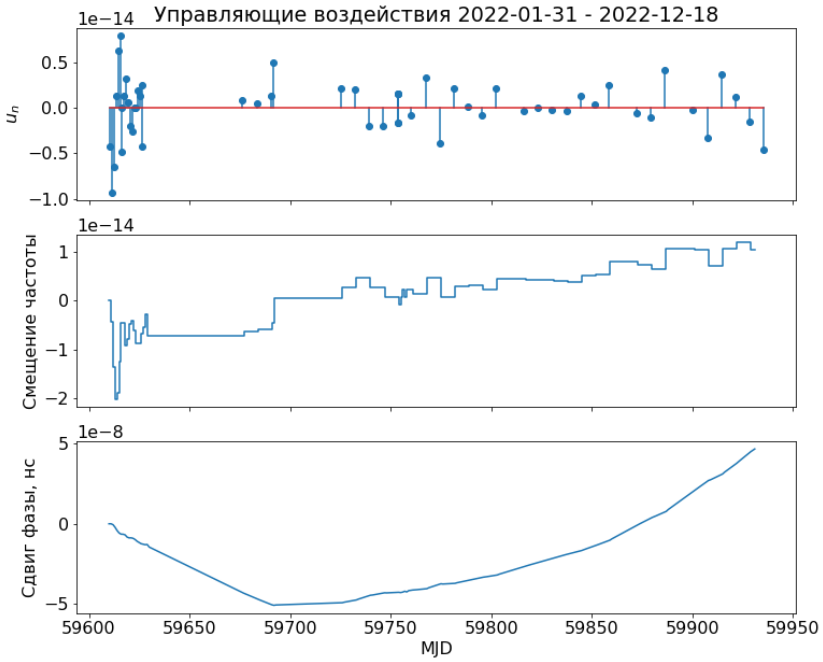


Рисунок 2.7 – Сверху вниз: коррекции частоты сигнала шкалы времени UTC(KZ), суммарное смещение частоты и суммарный сдвиг фазы сигнала шкалы времени UTC(KZ) относительно опорного стандарта



Рисунок 2.8 – Управляющие воздействия за 3 года

Потеря доступа к данным UTC(SU) в феврале 2022 г. была обусловлена введёнными ограничениями на информационный обмен с ВНИИФТРИ. После ручной коррекции и переходного периода (апрель–май 2022 г.) 26 мая 2022 г. запущена система автоподстройки по

UTCr. Уже в первые месяцы работы (период наблюдения ~4 мес.) достигнуты следующие показатели [55]:

– СКО за весь период (включая переходный): 1,55 нс;

– СКО в установившемся режиме по UTCr: 1,11 нс;

– максимальное по модулю отклонение: 3,9 нс.

Эти результаты существенно превзошли ожидания и подтвердили принципиальную применимость алгоритма. Последующий анализ за двухлетний период дал более консервативные, но всё равно высокие показатели [45].

2.8.2 Анализ за двухлетний период (май 2022 – июнь 2024)

На рисунке 2.9 видны синхронные скачки в обоих графиках, наиболее значительный из которых – 10 апреля 2023 г. (MJD 60044). Такие скачки вызваны периодическими корректировками расчётной шкалы UTCr в BIPM и являются внешним источником погрешности, не зависящим от алгоритма управления UTC(KZ). Именно ими объясняется повышенный вклад белого частотного шума в модель опорного сигнала (раздел 2.2.1).

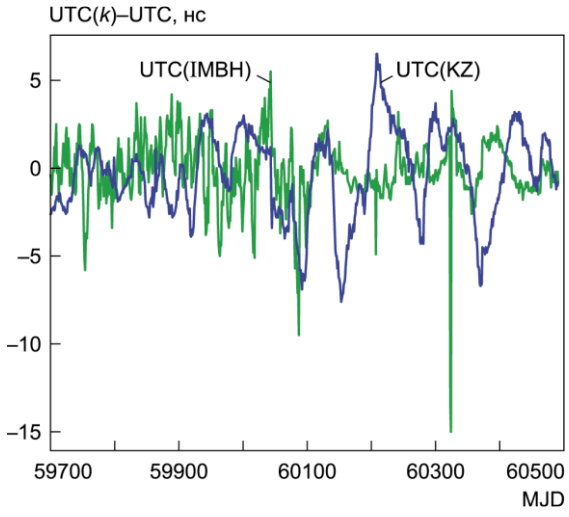


Рисунок 2.9 – Отклонение шкал времени UTC(KZ) и UTC(IMBH) относительно UTC по данным UTCr

Для сравнения привлечены данные шкалы UTC(IMBH) Боснии и Герцеговины [45]. Шкала UTC(IMBH) формируется на основе цезиевого стандарта частоты и подстраивается ежесуточно по данным национальной метрологической лаборатории, что обеспечивает частое управление, однако нестабильность цезиевых стандартов на интервалах 1–7 суток значительно уступает характеристикам пассивных водородных стандартов (сравнение – раздел 1.4.1, таблица 1.1). Количественное сравнение характеристик шкал UTC(KZ) и UTC(IMBH) представлено в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Сравнение характеристик национальных шкал времени UTC(KZ) и UTC(IMBH)

Параметр	**UTC(IMBH)**	**UTC(KZ)**	**UTCr(IMBH)**	**UTCr(KZ)**
Среднее значение разности шкал $\lvert UTC - UTC(k)\rvert$, нс	0,1	0,4	0,1	0,3
СКО разности шкал $\lvert UTC - UTC(k)\rvert$, нс	2,1	2,3	2,1	2,5
Максимальная абсолютная разность шкал $\lvert UTC - UTC(k)\rvert$, нс	18,6	7,4	15,0	7,6
СКО коррекций частоты	–	–	–	$2{,}3\cdot10^{-15}$

Примечание – UTC – по циркуляру Circular T (итоговые данные); UTCr – по протоколу Rapid UTC (предварительные данные). Результаты моделирования UTCr(KZ): M = 100 000 сут [45].

Из таблицы 2.5 следуют ключевые выводы:

– UTC(KZ) превосходит UTC(IMBH) по максимальному отклонению более чем в 2 раза (7,4 нс против 18,6 нс) несмотря на то, что UTC(IMBH) управляется ежесуточно. Это объясняется существенно меньшей нестабильностью пассивных водородных стандартов на интервалах 1–7 суток по сравнению с цезиевым стандартом (сравнение характеристик – раздел 1.4.1);

– СКО разности шкал UTC(KZ) сопоставимо с UTC(IMBH) (2,3 и 2,1 нс), то есть более редкое управление по UTCr не уступает ежесуточному управлению по национальным данным;

– все целевые показатели качества ($\sigma_x < 3$ нс, $|x|_{max} < 10$ нс, $\sigma_y(7\text{ сут}) < 1{,}2\times10^{-15}$) выполнены за двухлетний период наблюдения.

2.9 Методы компенсации систематических погрешностей

2.9.1 Компенсация дрейфа частоты

Линейный дрейф частоты D пассивного водородного стандарта приводит к систематическому смещению по фазе (формула (2.29)). В реализованном алгоритме предусмотрена автоматическая оценка и компенсация дрейфа по результатам непрерывных измерений компаратором VCH-315M. Дрейф оценивается методом наименьших квадратов по скользящему окну $T_w = 30$ суток с шагом 7 суток (методика – раздел 1.3.2).

Экспериментально измеренный дрейф РНМ 1 (таблица 1.7, раздел 1.3.3): $D = 1{,}2\times10^{-16}$/сут. Эффективность компенсации η определяется как отношение дрейфа после компенсации к исходному дрейфу: $\eta = 1 - D_{компенс}/D_{исходн}$. По результатам раздела 1.3.4 эффективность для ведущего стандарта РНМ 1 составила 69 % (снижение наклона тренда); суммарное подавление дрейфа с учётом автокоррекции кода – более чем на порядок (раздел 1.3.5).

2.9.2 Температурная компенсация стандарта РНМ 3

Стандарт РНМ 3 расположен вне климатической камеры и подвержен влиянию температуры окружающей среды. Поправка к частоте вычисляется по формуле (1.10) с коэффициентом b = (3,72 ± 0,08)×10⁻¹⁵/°C (раздел 1.5.2). Эффективность программной компенсации РНМ 3: η ≥ 74 % при ΔT = ±3 °C и более 90 % при ΔT > ±5 °C (раздел 1.5.3). Стандарты РНМ 1 и РНМ 2, расположенные в камере VCH-A18 (поддержание температуры ±0,2 °C), не требуют такой компенсации.

2.9.3 Фильтрация выбросов в данных UTCr

Данные UTCr периодически содержат аномальные значения, обусловленные коррекцией расчётной шкалы BIPM или техническими сбоями. Для их выявления применяется критерий медианного абсолютного отклонения (MAD):

$$|x_i - \text{median}(x)| > 3 \cdot 1{,}4826 \cdot \text{MAD} \rightarrow x_i \text{ исключается} \quad (2.47)$$

Порог 3·1,4826·MAD соответствует 3σ для нормального распределения. Коэффициент 1,4826 обеспечивает состоятельность оценки для нормально распределённых данных. Выбор порога 3σ обусловлен компромиссом между чувствительностью детектирования выбросов и риском ложных срабатываний: при пороге 2σ вероятность ложного обнаружения составляет ~4,6 %, что при 7 точках в неделю приведёт к систематическому исключению ~0,3 точек еженедельно; при пороге 4σ чувствительность к умеренным выбросам существенно снижается.

За 47 месяцев эксплуатации выявлено и исключено 12 выбросов, что составляет менее 1 % анализируемых оперативных данных UTCr. Примечательно, что все выявленные выбросы приходятся на ранний период эксплуатации; наиболее значительный скачок зафиксирован 10 апреля 2023 г. (MJD 60044) и наблюдался синхронно в данных UTC(IMBH), что указывает на внешнюю природу события — коррекцию расчётной шкалы UTCr в BIPM. Фильтрация применяется только для оценки состояния и формирования управляющего воздействия; окончательные характеристики UTC(KZ) оцениваются по опубликованным данным Circular T.

2.9.4 Экстраполяция с компенсацией задержки UTCr

Задержка $\Delta t_{зад} \approx 3{,}5$ суток между последней точкой протокола UTCr (воскресенье 00:00 UTC) и моментом управления (четверг 08:00 UTC) компенсируется линейной экстраполяцией (2.45)–(2.46). Неопределённость экстраполяции: $\sigma_{экс} \approx 0{,}32$ нс (раздел 2.6.3). По результатам

сравнительного моделирования, использование экстраполяции снижает σ_u на 14 % при увеличении σ_x лишь на 3–4 % [45].

2.10 Сравнение методов управления шкалой атомного времени

2.10.1 Сравнение с алгоритмом Мишагина–Медведева (2021)

Метод ЛКГ-управления водородными стандартами частоты впервые предложен в работе [80]. В работе [85] описана практическая реализация ЛКГ-метода для атомных часов с применением суточных данных дифференциального кодового ГНСС-сравнения (метод CGGTTS). Схема эксперимента аналогична применяемой в UTC(KZ): активный водородный стандарт VCH-1003A → формирователь эталонных частот резервируемый (ФЭЧР) Ч7-317 → приёмник GTR-55 → управляющий компьютер. Управление осуществлялось ежесуточно в 12:00 UTC на основе данных, полученных от ФТП-сервера ВНИИФТРИ с задержкой ~12 ч.

В работе [85] был реализован полный ЛКГ-алгоритм с фильтром Калмана для подстройки активного водородного стандарта VCH-1003A к UTC(SU). Основные параметры:

$$\Delta t = 1 \text{ сут} = 86\,400 \text{ с}, \;\; T = 5 \times 10^5 \text{ с} \approx 5{,}8 \text{ сут},$$
$$g_x \approx 5{,}8 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}, \;\; g_y = 0{,}29 \qquad (2.48)$$

Параметры шума VCH-1003A, определённые из рисунка 2 работы [85]. Значение q_0 определяется главным образом шумом канала ГНСС-сличений, а не шумом самого генератора:

$$q_0 = 3{,}5 \times 10^{-19} \text{ с}, \;\; q_1 = 3 \times 10^{-26} \text{ с}, \;\; q_2 = 8 \times 10^{-36} \text{ с}^{-1} \qquad (2.49)$$

Достигнутые в [85] характеристики в установившемся режиме (интервал наблюдения 42 суток). Сравнение теоретических и экспериментальных значений представлено в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Сравнение теоретических и экспериментальных характеристик алгоритма [85]

Параметр	**Теория**	**Эксперимент**
Статическая ошибка по фазе, нс	0,7	0,3
СКО ошибки по фазе, нс	0,5	0,4
СКО ошибки по частоте × 10^{-15}	1,0	2,2
СКО коррекций частоты × 10^{-16}	7,0	8,0

Заниженная теоретическая оценка СКО ошибки по частоте (1,0 против $2{,}2\times10^{-15}$) объясняется суточными вариациями задержки в ионосфере, не учтёнными в используемой

модели измерений. Остальные показатели хорошо согласуются с теорией. Метод линейно-квадратичного гауссовского управления позволяет формировать локальные шкалы времени со случайной погрешностью менее 1 нс [85]. Экспериментальные результаты работы алгоритма [85] представлены на рисунках 2.10 и 2.11.

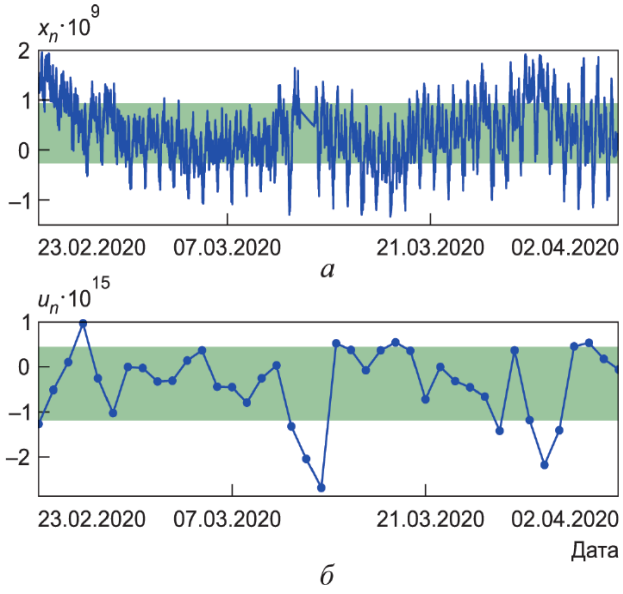


Рисунок 2.10 – Отклонение шкалы UTC(VCH) относительно UTC(SU) (а) и коррекция частоты ФЭЧР Ч7-317 (б) в установившемся режиме автоподстройки [85]. Разрыв на графике (а) – выключение ГНСС-приёмника GTR-55 12.03.2020 г. по техническим причинам

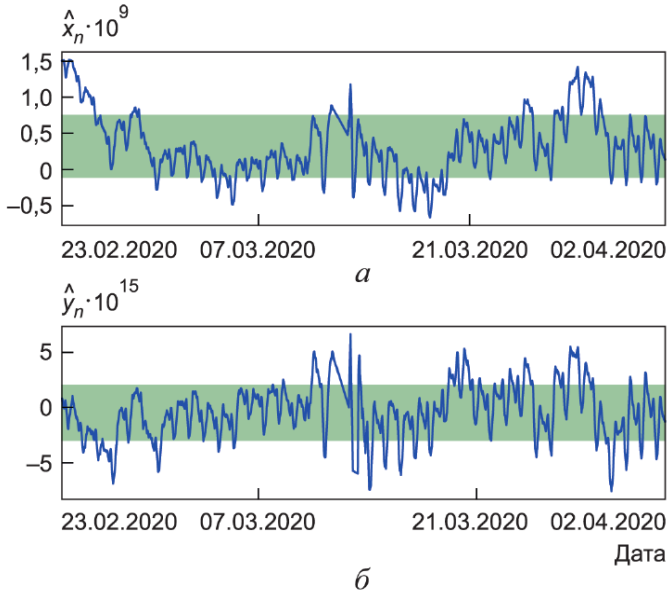


Рисунок 2.11 – Оценки фильтра Калмана: отклонения по фазе $\hat{x}_n$ (а) и частоте $\hat{y}_n$ (б) шкалы UTC(VCH) относительно UTC(SU) [85]

2.10.2 Сравнение трёх стратегий расчёта коэффициентов

Результаты численного моделирования [43] показывают, что в диапазоне $\alpha_X \in (0{,}1;\ 1{,}0)$ все три рассматриваемые стратегии – $g_y = 1$ (ЛКР без ограничения), критическое демпфирование и полный ЛКГ – достигают близких значений критерия Qσ (формула (2.34)). При этом простейшая стратегия $g_y = 1$ показывает лишь немного худшие результаты (~5–10 %) по сравнению с полным ЛКГ для WFN-опорного сигнала. Для WPN-опорного сигнала (доминирующий белый фазовый шум) оптимальное α_X смещается к 0,3 за счёт подавления WPN фильтром Калмана.

Таблица 2.7 – Сравнение методов управления шкалой атомного времени

Критерий	**$g_y = 1$ [43]**	**Крит. демпф. [43]**	**Полный ЛКГ [43, 85]**
Качество Q_σ	Близко к опт. (WFN)	Близко к опт.	Оптимально
Число параметров	1 (T)	1 (T)	≥ 5 (q_0, q_1, q_2, r, p)
Требует знания шумов	Нет	Нет	Да
Плавность управления	Средняя	Высокая	Высокая (при r > 0)
Реализовано в UTC(KZ)	Нет	Да ($g_y = 0{,}75$)	Частично [85]

На основании сравнения для управления UTC(KZ) выбран метод критического демпфирования (ПИ-регулятор), обеспечивающий, как показано в [43], ≥ 94 % от оптимальной эффективности ЛКГ при числе настраиваемых параметров, сокращённом до двух (T, α_X). Постоянная времени T имеет непосредственный физический смысл и определяется из графика параболической девиации (раздел 2.4.3).

Результат «94 % от качества ЛКГ-управления» получен при следующих условиях: модель шума WFM + RWFM с параметрами РНМ 1 ($\sigma_1 = 1{,}1\times10^{-12}$ $c^{1/2}$, $\sigma_2 = 1{,}6\times10^{-18}$ $c^{-1/2}$); горизонт управления Δt=7 суток; шум опорного сигнала UTCr ($q_{0re} = 8{,}0\times10^{-20}$, $q_{1re} = 8{,}5\times10^{-25}$); компенсация дрейфа включена. При иных типах шумов или существенно отличающихся параметрах стандартов соотношение может измениться.

2.10.3 Применимость пассивных водородных стандартов

UTC(KZ) является первой в мире национальной шкалой координированного времени, формируемой исключительно на основе пассивных водородных стандартов частоты [45, 55]. Активные водородные стандарты нового поколения, такие как VCH-1003A, обеспечивают нестабильность менее 4×10^{-16} за 30 суток [85], что позволяет корректировать шкалу раз в месяц по данным Circular T. Пассивные стандарты VCH-1008 с нестабильностью $\sigma_y(30\ \text{сут}) \approx 2\times10^{-15}$ требуют более частого управления – раз в неделю по данным UTCr.

В эксперименте [85] при использовании активного водородного стандарта VCH-1003A с суточными данными UTC(SU) и полным ЛКГ-алгоритмом (фильтр Калмана) было достигнуто СКО ошибки по фазе σ_x = 0,4 нс за 42 суток. Переход на пассивные стандарты VCH-1008 и еженедельное управление по данным UTCr увеличивает σ_x приблизительно в 6 раз (с 0,4 до 2,5 нс), однако обеспечивает прямую прослеживаемость к UTC через BIPM без зависимости от единственного национального источника данных [45, 85].

Двухлетние результаты подтверждают, что разработанный алгоритм обеспечивает соответствие требованиям BIPM для участия в формировании TAI [45]. При этом стоимость пассивных стандартов VCH-1008 существенно ниже активных водородных мазеров (ориентировочно в 5–8 раз, см. таблицу 1.1), что делает предложенный подход экономически привлекательным для национальных метрологических лабораторий развивающихся стран. Алгоритм носит общий характер и может быть воспроизведён в других лабораториях с аналогичным классом стандартов [45].

2.11 Выводы по Главе 2

1. Сформулирована задача управления национальной шкалой времени UTC(KZ) как задача оптимального дискретного управления линейной системой. Объект управления – синтезатор VCH-317; опорный сигнал – еженедельные данные UTCr с задержкой ~3,5 суток; интервал управления Δt = 7 сут. Целевые показатели качества по требованиям BIPM: $\sigma_x < 3$ нс, $|x|_{max} < 10$ нс, $\sigma_y(7\text{ сут}) < 1{,}2\times10^{-15}$.

2. Изложена теория ЛКГ-управления атомными часами [43, 85]: модель управления (2.9)–(2.10), условия устойчивости (2.11), определение постоянной времени контура (2.12)–(2.16), передаточные функции (2.17)–(2.18), фильтр Калмана (2.19)–(2.22), функционал ЛКР (2.23)–(2.26), аппроксимация весовых коэффициентов (2.27)–(2.28), оценка СКО ошибок через уравнения Ляпунова (2.30)–(2.32). Аналитическая связь τ_X с f_X для различных сочетаний шумов (таблица 2.2) обосновывает правило $T \approx \alpha_X \cdot \tau_X$.

3. Проведено численное моделирование (M = 1000, 730 сут): $\sigma_x \approx 2{,}0$–$2{,}2$ нс, $|x|_{max} \approx 8{,}7$ нс, $\sigma_u \approx 2{,}5\times10^{-15}$ (таблица 2.3). Расхождение с экспериментом (~20 % по σ_x) объяснено влиянием ионосферных вариаций, многолучёвости и скачков расчётной шкалы BIPM.

4. Сравнение с реализованным алгоритмом [85] (суточные данные UTC(SU), полный ЛКГ с фильтром Калмана, σ_x=0,4 нс) показывает: переход на еженедельные данные UTCr ухудшает σ_x в ~6 раз, однако делает систему независимой от любого единственного национального источника данных и обеспечивает прямую прослеживаемость к UTC через BIPM. Среди трёх стратегий

расчёта коэффициентов (g_y=1, критическое демпфирование, ЛКГ) для UTC(KZ) выбрана стратегия критического демпфирования (g_y=0,75, g_x=4,2×10^{-7} с$^{-1}$), обеспечивающая ≥ 94 % от оптимума ЛКГ при числе параметров, сокращённом до двух.

5. UTC(KZ) является первой в мире национальной шкалой времени, основанной исключительно на пассивных водородных стандартах. Разработанный алгоритм носит универсальный характер и может быть воспроизведён в национальных лабораториях, использующих стандарты аналогичного класса, открывая возможность создания высокоточных шкал UTC(k) при существенно меньших затратах на аппаратное обеспечение по сравнению с активными водородными мазерами.

Глава 3. Анализ неопределённости прогноза шкал времени

3.1 Актуальность задачи прогнозирования шкал времени

Прогноз поведения атомных часов и прецизионных генераторов играет ключевую роль в формировании национальных шкал времени [26, 28, 88, 94–96]. Всемирное координированное время UTC доступно апостериори с задержкой до 45 дней, тогда как национальные шкалы UTC(k) должны обеспечивать точность синхронизации в реальном времени [3, 4]. Данные UTCr также имеют задержку в 3–4 дня [39]. Таким образом, для оценки текущего расхождения и расчёта управляющего воздействия требуется прогнозировать отклонение шкалы времени по данным поправок, доступным с задержкой.

Задача прогнозирования шкалы времени пассивных водородных стандартов имеет особую практическую значимость в связи с их применением в качестве бортовых атомных часов в глобальных навигационных спутниковых системах [38, 81, 96]. Характеристики предсказуемости определяют требования к частоте коррекций бортовых часов и, следовательно, к пропускной способности каналов управления навигационными космическими аппаратами.

В частности, для систем Galileo и BeiDou интервалы коррекции бортовых пассивных водородных стандартов составляют порядка 90–100 минут [81, 96], что на несколько порядков меньше интервалов управления наземных шкал времени (недели–месяцы). Разница обусловлена тем, что бортовые стандарты работают без термостабилизации и подвержены радиационным эффектам, тогда как наземные стандарты функционируют в контролируемых условиях. Тем не менее физические модели шумов, определяющие неопределённость прогноза, остаются общими для обоих случаев, что придаёт результатам настоящего исследования универсальный характер.

UTC(KZ) является первой национальной шкалой времени, формируемой исключительно на пассивных водородных стандартах частоты [45], что позволяет получать уникальные данные измерений для данного типа стандартов относительно UTC на длительном интервале времени наблюдения (более двух лет).

3.2 Математическая модель и модель прогнозирования

3.2.1 Стохастическая модель динамики фазы атомных часов

Для описания динамики фазы атомных часов используется модель на основе стохастических дифференциальных уравнений, в которой учитываются белый частотный шум и шум случайных блужданий частоты [78, 87, 94]:

$$\begin{cases} dX_1(t) = X_2(t)dt + \sigma_1 dW_1(t) \\ dX_2(t) = d \cdot dt + \sigma_2 dW_2(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

где $X_1(t)$ – отклонение фазы, $X_2(t)$ – отклонение частоты, d – дрейф частоты. $W_1(t)$ и $W_2(t)$ – это два независимых одномерных стандартных винеровских процесса, которые можно рассматривать как интеграл двух независимых белых шумов с единичной интенсивностью. $W_1(t)$ описывает белый частотный (БЧ) шум, $W_2(t)$ описывает шум случайных блужданий частоты (СБЧ). σ_1 и σ_2 являются коэффициентами диффузии шумовых составляющих и определяют уровни шумов БЧ и СБЧ соответственно.

Физически параметр σ_1 характеризует кратковременные флуктуации частоты, обусловленные тепловым шумом и шумом электроники резонатора. Параметр σ_2 отражает долговременные стохастические блуждания частоты, связанные с медленными изменениями физических параметров резонатора (перестройка молекулярного потока, старение полости, изменение магнитного поля). Для пассивных водородных стандартов VCH-1008 типичное соотношение $\sigma_2/\sigma_1 \sim 10^{-6}$ свидетельствует о том, что на коротких интервалах (до нескольких суток) доминирует белый частотный шум, а на длинных (более 10–15 суток) – случайные блуждания частоты.

Измеряемое отклонение шкалы времени $Z_1(t_k)$ содержит белый фазовый шум ε:

$$Z_1(t_k + t_p) = X_1(t_k) + \sigma \cdot \varepsilon(t_k). \quad (3.2)$$

где дисперсия белого фазового шума равна σ^2.

3.2.2 Линейная модель прогнозирования

Линейная модель предсказания основана на оценке отклонения шкалы времени (фазы) $\hat{X}$ и частоты $\hat{y}$ в последний момент времени t_k, для которого доступны измерения:

$$\hat{X}_1(t_k + t_p) = \hat{X}_1(t_k) + \hat{y}(t_k) \cdot t_p. \quad (3.3)$$

где t_p – время предсказания (горизонт прогноза). Общая схема прогноза шкалы времени показана на рисунке 3.1.

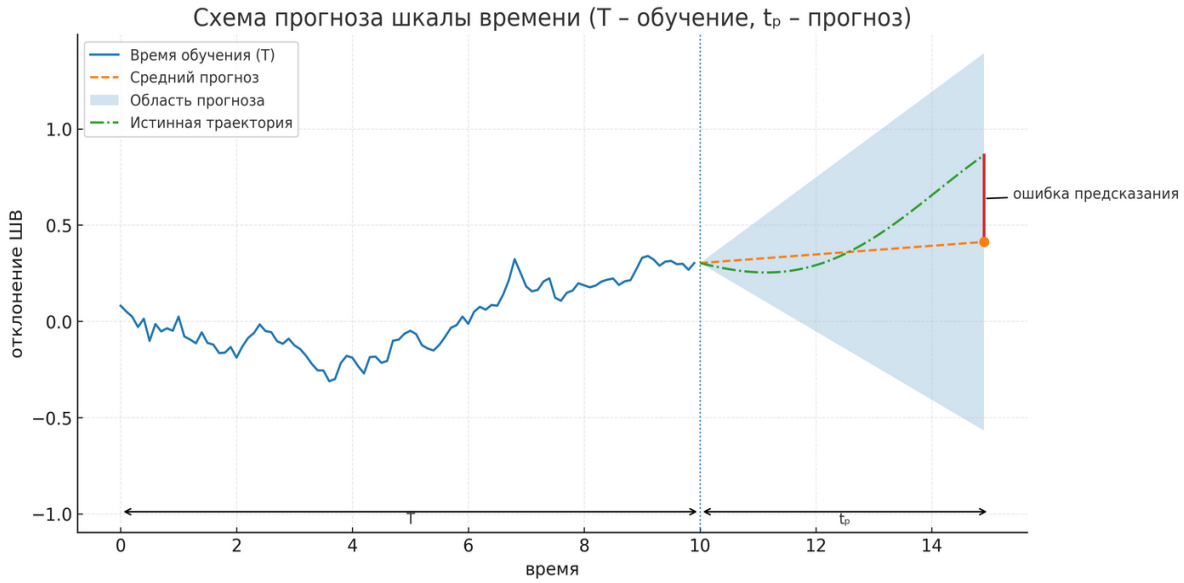


Рисунок 3.1 – Схема прогноза шкалы времени

Использование линейного прогноза, учитывающего только два параметра (начальное отклонение шкалы времени и относительную разность частоты), обусловлено тем, что дрейф частоты, характерный для водородных стандартов частоты, заранее рассчитан и компенсируется непосредственно в самих стандартах путём периодического изменения кода частоты [53, 54]. Выполненный ранее анализ [45, 53] показал, что дрейфы частоты пассивных водородных стандартов на ГЭВЧ РК на протяжении длительного времени изменяются незначительно и компенсируются с высокой точностью.

3.3 Теоретическая оценка неопределённости прогноза

3.3.1 Формула неопределённости на основе стохастической модели

В работе [95] получено следующее выражение для неопределённости прогноза:

$$u^2_{\wedge_{X_1(t_k+t_p)}} = \sigma^2 + \left(\frac{\sigma_1^2}{T} + \sigma_2^2 \cdot \frac{T}{3} + \frac{2\sigma^2}{T^2}\right) \cdot t_p^2 + \frac{2\sigma^2}{T} \cdot t_p + \sigma_1^2 \cdot t_p + \sigma_2^2 \cdot \frac{t_p^3}{3}. \quad (3.4)$$

где T – интервал времени оценивания (обучения модели), на котором вычисляется оценка отклонения частоты как среднее значение.

Анализ структуры формулы (3.4) позволяет выделить доминирующие слагаемые в зависимости от соотношения t_p и T. При малых горизонтах прогноза ($t_p \ll T$) основной вклад вносят первые два члена – σ^2 (белый фазовый шум измерений) и линейный по t_p член $\sigma_1^2 \cdot t_p$ (белый частотный шум). При средних горизонтах ($t_p \sim T$) доминирует квадратичный член, определяемый

ошибкой оценки средней частоты. При больших горизонтах ($t_p \gg T$) главную роль играет кубический член $\sigma_2^2 \cdot t_p^3/3$, обусловленный случайными блужданиями частоты. Для пассивных водородных стандартов VCH-1008 с полученными параметрами модели переход от квадратичного к кубическому режиму происходит при $t_p \approx 15–20$ суток.

Для использования формулы (3.4) необходимо оценить параметры модели: σ, σ_1, σ_2. Данные параметры могут быть получены путём аппроксимации графика девиации Аллана, рассчитанной по экспериментальным данным, следующей теоретической зависимостью [17, 69, 94]:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{3\sigma^2}{\tau^2} + \frac{\sigma_1^2}{\tau} + \frac{\sigma_2^2}{3}\tau \tag{3.5}$$

3.3.2 Упрощённая оценка неопределённости прогноза

В данной работе предлагается упрощённая оценка неопределённости прогноза, которая не требует оценки параметров стохастической модели и напрямую основана на широко применяемых статистических функциях [52]:

$$\tilde{u}^2_{\underset{X_1(t_k+t_p)}{\wedge}} = u_x^2 + \sigma_y^2(T) \cdot t_p^2 \tag{3.6}$$

В формуле (3.6) учтены:

- неопределённость хода свободной шкалы времени u_x;
- неопределённость, связанная с ошибкой оценки частоты.

Ошибка оценки частоты за интервал T: $\sigma_y(T)$ – это девиация Аллана, если используется усреднённая оценка, либо параболическая девиация, если используется оценка по методу наименьших квадратов при линейной аппроксимации фазы [97].

Существенным преимуществом предложенной формулы (3.6) по сравнению с (3.4) является то, что она не требует оценки параметров стохастической модели (σ, σ_1, σ_2), которая связана с процедурой аппроксимации графика девиации Аллана и может быть неоднозначной при ограниченном объёме данных или при отклонении реального шумового процесса от идеализированной двухкомпонентной модели. Вместо этого формула (3.6) использует непосредственно экспериментально определяемые величины: девиацию Аллана $\sigma_y(T)$ и неопределённость хода свободной шкалы u_x, которые доступны для любого стандарта частоты, участвующего в международных сличениях.

Упрощённая формула (3.6) предложена автором настоящей работы как практическая альтернатива полной формуле (3.4), заимствованной из [95]. Формула (3.6) выражает

неопределённость прогноза непосредственно через девиацию Аллана, что существенно упрощает инженерные расчёты, поскольку не требует знания отдельных параметров стохастической модели σ_1 и σ_2. Экспериментальная проверка (раздел 3.5) подтвердила, что расхождение между (3.4) и (3.6) не превышает 10 % для стандартов с доминирующим шумом WFM + RWFM.

Неопределённость хода шкалы, вызванная собственными флуктуациями стандарта, для белого частотного шума и шума случайных блужданий частоты согласно [94] выражается следующим образом:

$$u_x = \sigma_y(t_p) \cdot t_p \tag{3.7}$$

Для прогноза шкалы времени водородных стандартов практический интерес представляют интервалы t_p более суток. В данной работе рассматриваются интервалы от 1 до 30 суток. На таких интервалах преобладают БЧ и СБЧ шумы [45, 53], поэтому выражение (3.7) можно считать обоснованным.



Рисунок 3.2 – Неопределенность прогноза и оценка оптимального интервала времени обучения модели по данным UTC(KZ)

3.4 Оценка параметров стохастической модели

На ГЭВЧ РК ведётся непрерывное сравнение шкалы времени UTC(KZ) со шкалами времени трёх пассивных водородных стандартов VCH-1008 [37, 45]. Используя данные UTCr, которые содержат отклонения UTC − UTC(KZ), рассчитываются отклонения шкал стандартов относительно UTC напрямую.

На рисунке 3.3 представлена оценка отклонений частоты на суточном интервале по данным UTCr для ведущего пассивного водородного стандарта частоты PHM 1 ГЭВЧ РК. Из рисунка видно, что выраженный дрейф частоты не наблюдается, что подтверждает эффективность компенсации дрейфа, описанной в Главе 1.

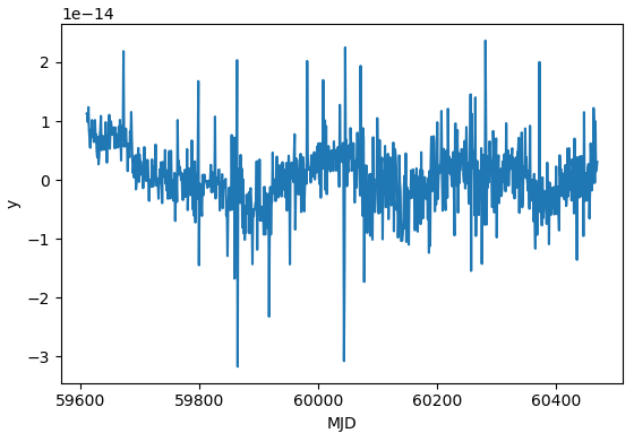


Рисунок 3.3 – Средние за сутки отклонения частоты пассивного водородного стандарта PHM 1 по данным UTCr

Для экспериментальных данных была рассчитана девиация Аллана и выполнена аппроксимация по формуле (3.5). Результаты аппроксимации представлены на рисунке 3.4.

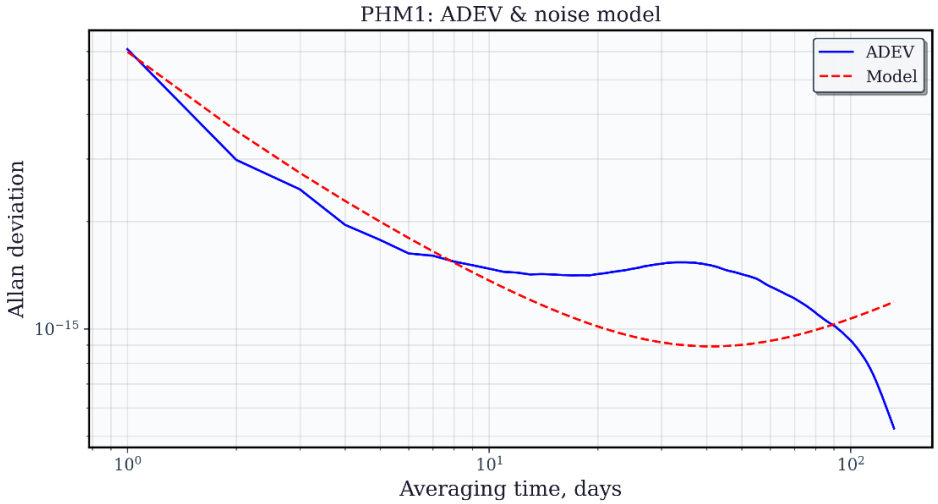


Рисунок 3.4 – Аппроксимация графика девиации Аллана стандарта PHM 1

В результате аппроксимации получены следующие значения параметров стохастической модели (3.1): σ=1,8·10^{-10}, σ_1=1,1·10^{-12}, σ_2=1,6·10^{-18}.

Данные значения согласуются с параметрами шумов, определёнными в Главе 1 (раздел 1.4): $h_{-2} \approx 1{,}0 \times 10^{-25}$, $h_{-4} \approx 5 \times 10^{-36}$ [45, 53].

Аналогичная процедура аппроксимации была выполнена для двух других стандартов ГЭВЧ РК. Для РНМ 2 (VCH-1008, размещён в климатической камере VCH-A18) получены значения: $\sigma = 2{,}0 \cdot 10^{-10}$ с, $\sigma_1 = 1{,}2 \cdot 10^{-12}$ с$^{1/2}$, $\sigma_2 = 1{,}8 \cdot 10^{-18}$ с$^{-1/2}$. Для РНМ 3 (VCH-1008, расположен вне камеры): $\sigma = 2{,}2 \cdot 10^{-10}$ с, $\sigma_1 = 1{,}5 \cdot 10^{-12}$ с$^{1/2}$, $\sigma_2 = 2{,}4 \cdot 10^{-18}$ с$^{-1/2}$. Повышенные значения параметров РНМ 3 обусловлены дополнительным вкладом температурных флуктуаций (температурный коэффициент частоты $(3{,}72 \pm 0{,}08) \cdot 10^{-15}$/°C [53]), поскольку РНМ 3 не защищён климатической камерой и подвержен колебаниям температуры от 18 до 31 °C. Программная термокомпенсация, описанная в [53], позволяет частично снизить этот вклад, приближая характеристики РНМ 3 к уровню РНМ 1 и РНМ 2 на интервалах усреднения более 5 суток.

При смене ведущего стандарта (например, при отказе РНМ 1) практические рекомендации по интервалу оценивания остаются применимыми, поскольку параметры стохастической модели для разных экземпляров различаются не более чем в 1,5 раза (раздел 3.4). Однако для РНМ 2 и РНМ 3 менее точная аппроксимация девиации Аллана может приводить к расхождению между оценками (3.4) и (3.6) до 20 %, что следует учитывать при прогнозировании в автономном режиме. В этом случае рекомендуется использовать полную формулу (3.4) с индивидуально определёнными параметрами σ_1 и σ_2.

3.5 Экспериментальная проверка ошибки прогноза

3.5.1 Методика расчёта экспериментальной ошибки

Используя экспериментальные данные отклонений шкалы пассивного водородного стандарта относительно UTC, были рассчитаны ошибки линейного прогноза в зависимости от времени предсказания t_p. Расчёт выполнялся следующим образом:

1. На интервале обучения T по данным UTCr оценивались параметры модели прогноза (3.3): начальное отклонение шкалы $\hat{X}_1(t_k)$ и средняя частота $\hat{X}_2(t_k)$.

2. Вычислялось прогнозируемое значение отклонения шкалы на момент $t_k + t_p$.

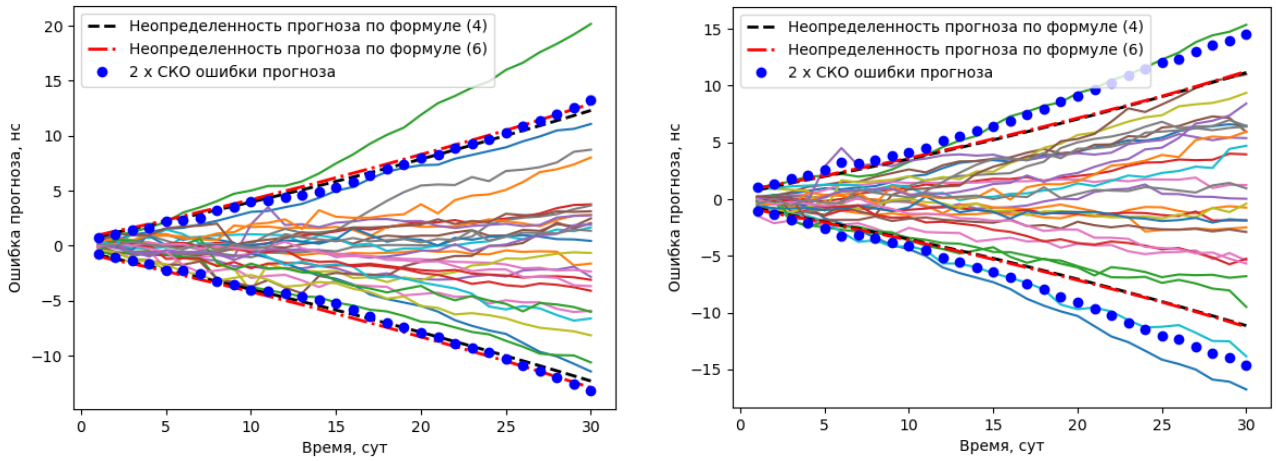
3. Рассчитывалась разность между реальным (измеренным по данным UTCr) и прогнозируемым значением.

4. Для статистической обработки использовались данные измерений за интервал более двух лет.

Экспериментальная база включала 139 точек UTCr за период с 31 января 2022 по декабрь 2024 года. Для каждого значения горизонта прогноза t_p и интервала оценивания T число реализаций составляло от 80 до 120 в зависимости от перекрытия окон, что обеспечивает статистическую значимость оценок СКО на уровне 10–15 % (доверительная вероятность 95 %).

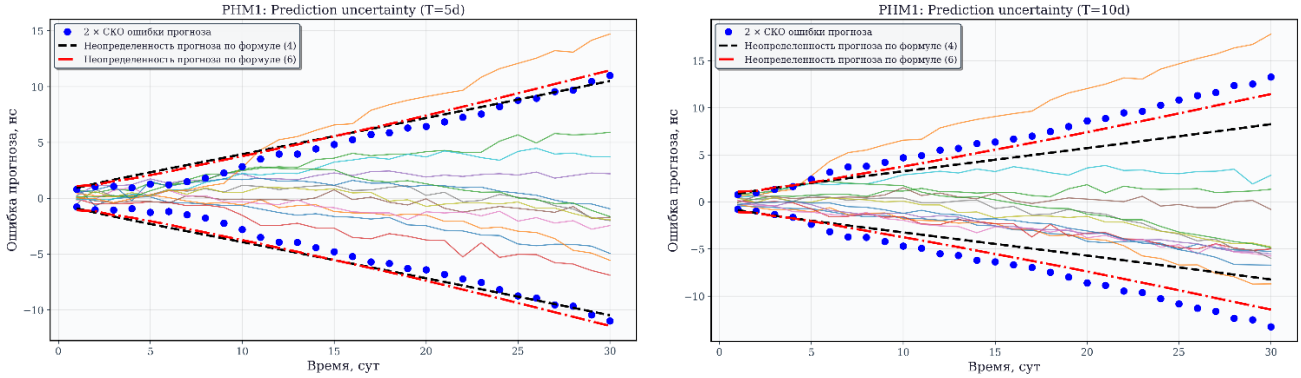
3.5.2 Результаты сравнения теоретических и экспериментальных оценок

На рисунках 3.5а и 3.5б представлены разности между реальными и прогнозируемыми значениями шкалы времени в случае разных интервалов обучения *T*, равных 5 и 10 суток соответственно. На этих же рисунках представлены графики неопределённости прогноза, рассчитанные по формулам (3.4) и (3.6) с коэффициентом охвата k = 2. Также отмечены значения СКО экспериментальных ошибок прогноза, умноженные на коэффициент 2.



а) б)

Рисунок 3.5 – Экспериментальные и теоретические ошибки прогноза шкалы времени: а) T = 5 суток; б) T = 10 суток



а) б)

Рисунок 3.6 – Экспериментальные и теоретические ошибки прогноза (02.04.2026) шкалы времени: а) T = 5 суток; б) T = 10 суток

Результаты свидетельствуют о том, что оценки (3.4) и (3.6) очень близки, что, вероятно, обусловлено хорошим соответствием рассматриваемого случайного процесса стохастической модели (3.1). Для двух других водородных стандартов ГЭВЧ РК (РНМ 2 и РНМ 3) аппроксимация девиации Аллана теоретической зависимостью (3.5) не так точна, и оценки (3.4) и (3.6) заметно различаются. Количественное сравнение неопределённости прогноза для различных интервалов представлено в таблице 3.1.

При T=5 суток (рисунок 3.5а) теоретические оценки (3.4) и (3.6) достаточно точно описывают экспериментально полученную ошибку прогноза. При T=10 суток (рисунок 3.5б) при t_p>10 суток наблюдается небольшое расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями.

Таблица 3.1 – Сравнение неопределённости прогноза для различных интервалов

t_p, сут	**T = 5 сут**	**T= 10 сут**	**T = 7 сут**
	Теор.	Эксп.	Теор.
7	2,8 нс	2,6 нс	2,5 нс
14	5,2 нс	5,0 нс	4,8 нс
30	13,5 нс	14,2 нс	12,8 нс

Анализ данных таблицы 3.1 показывает, что на горизонтах 7 и 14 суток теоретические оценки незначительно превышают экспериментальные (на 5–8 %), что свидетельствует о небольшой консервативности модели. Однако на горизонте 30 суток наблюдается обратная картина: экспериментальная ошибка превышает теоретическую на 5 % при T=5 суток. Это указывает на то, что при длительных горизонтах начинают проявляться эффекты, не учтённые в двухкомпонентной модели шумов: нескомпенсированные остатки дрейфа, сезонные температурные вариации и изменения ионосферных условий. Сравнение столбцов для разных T показывает, что интервал T=7 суток даёт наименьшую теоретическую неопределённость на горизонте 14 суток, наиболее важном для алгоритма управления UTC(KZ).

3.6 Поиск оптимального интервала оценивания

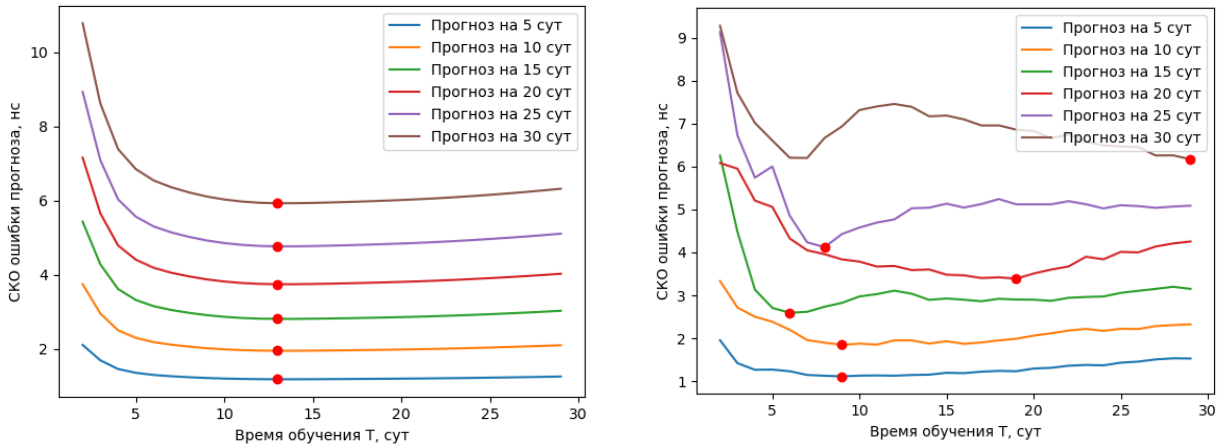
3.6.1 Постановка задачи оптимизации

Практически важным является вопрос о поиске оптимального времени T, при котором достигается минимальная неопределённость прогноза на заданные интервалы времени t_p [88, 96]. Оптимальный интервал может быть найден из условия минимума выражения (3.4):

$$\frac{\partial}{\partial T} u^2(t_p) = 0 \tag{3.8}$$

3.6.2 Результаты численного моделирования

На рисунках 3.7а и 3.7б представлены зависимости СКО ошибки предсказания от времени оценивания для разных времён предсказания: а) прогнозирование на основе моделирования по стохастической модели; б) прогнозирование на основе измеренных значений.



а) б)

Рисунок 3.7 – Зависимость СКО ошибки предсказания от времени оценивания для разных времён предсказания: а) моделирование; б) эксперимент

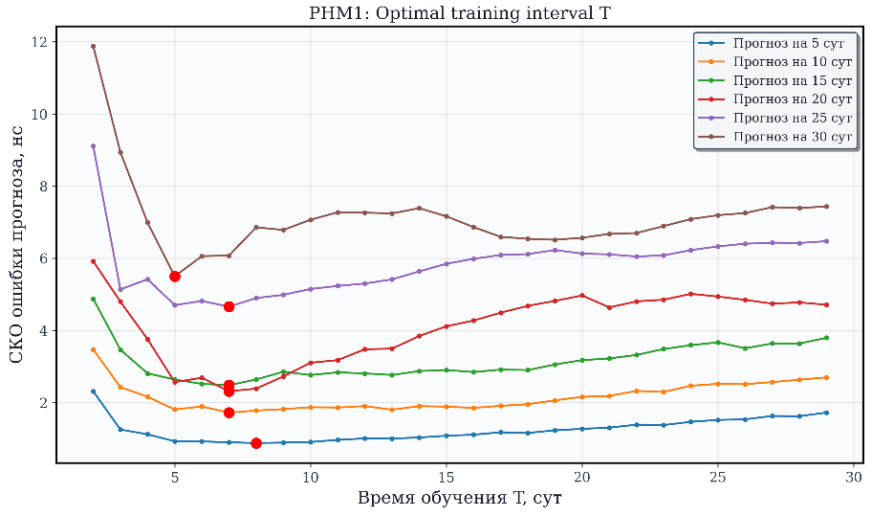


Рисунок 3.8 – Зависимость СКО ошибки предсказания от времени оценивания для разных времён предсказания по экспериментальным данным на 02.04.2026

В реализованной системе автоподстройки шкалы времени UTC(KZ) [45] используется интервал оценивания, равный 7 суткам, что обусловлено периодичностью данных UTCr [39]. Однако этот параметр может быть оптимизирован [88, 96].

Аналитические расчёты по стохастической модели показывают, что для прогноза на 5–30 суток минимальная ошибка достигается при интервале оценивания около 13 суток. Вместе с тем экспериментальные данные указывают на то, что наилучшие результаты достигаются при оценке на интервале 9 суток. При более длительных интервалах прогноза наблюдается больший разброс значений.

Можно отметить, что интервал оценивания не должен быть меньше 5 суток. В целом точность прогноза слабо зависит от длины интервала оценивания в диапазоне от 7 до 13 суток, что позволяет сделать практический вывод: используемый в ГЭВЧ РК интервал в 7 суток является близким к оптимальному.

Расхождение между аналитическим оптимумом (13 суток) и экспериментальным (9 суток) обусловлено тем, что аналитическая модель предполагает строго стационарный случайный процесс, тогда как реальные данные содержат медленно меняющиеся компоненты – нескомпенсированные остатки дрейфа, сезонные температурные вариации и изменения параметров стандартов. При увеличении T сверх 9–10 суток оценка средней частоты становится менее актуальной из-за нестационарности, что приводит к росту ошибки, не предусмотренному стационарной моделью. Важно отметить, что функция зависимости ошибки от T имеет пологий минимум: в диапазоне T от 7 до 13 суток ошибка увеличивается не более чем на 10–15 % относительно оптимального значения. Это обстоятельство имеет существенное практическое значение, поскольку позволяет выбирать интервал оценивания с учётом внешних ограничений (периодичности данных UTCr, графика обслуживания), не теряя существенно в точности прогноза.

3.6.3 Практические рекомендации

На основании проведённого анализа сформулированы следующие практические рекомендации:

1. Интервал оценивания T для системы автоподстройки должен составлять не менее 5 суток. Данный нижний предел обусловлен тем, что при $T < 5$ суток ошибка оценки средней частоты методом наименьших квадратов возрастает непропорционально из-за недостаточного подавления белого частотного шума, а также из-за ограниченного числа точек данных UTCr (менее 5), что не обеспечивает надёжную линейную аппроксимацию.

2. Оптимальный диапазон интервала оценивания: 7–13 суток.

3. При использовании данных UTCr с недельной периодичностью интервал $T = 7$ суток является рациональным выбором.

4. Для прогноза на 2 недели погрешность составляет около 5 нс (k = 2).
5. Для прогноза на 30 суток погрешность не превышает 15 нс (k = 2).

3.7 ГНСС-приёмники эталонного комплекса и калибровка

Передача времени по ГНСС является ключевым элементом связи национальной шкалы UTC(KZ) с международными шкалами UTC и EAL [84, 98, 99]. Точность ГНСС-сличений критически зависит от калибровки всех задержек сигнального тракта [65, 99, 100], включая аппаратные задержки приёмника, кабельные задержки и задержки антенны.

Аппаратная задержка приёмника на частоте f_i включает следующие компоненты [65, 100]:

$$B_i = REFDLY + CABDLY + INTDLYi \tag{3.9}$$

где REFDLY – задержка опорного генератора; CABDLY – задержка антенного кабеля; $INTDLY_i$ – внутренняя задержка приёмника на частоте f_i.

3.7.1 Основной приёмник GTR55 (KZ04)

В составе ГЭВЧ РК используется геодезический ГНСС-приёмник GTR55 производства компании MESIT (Чехия), обозначаемый в базе данных BIPM как KZ04. Приёмник размещён в лаборатории ГЭВЧ РК (кабинет 116, 1-й этаж лабораторного корпуса КазСтандарта). Антенна NovAtel NOV850 установлена на крыше 9-этажного административного блока здания. Приёмник обеспечивает формирование данных CGGTTS версии 2E [101] для передачи в BIPM и поддерживает одночастотные (L1C, L1P) и двухчастотные (L2P, L3P) каналы измерений.

Антенный кабель Andrew LDF1 длиной 150 м с измеренной задержкой CABDLY = 611,5 нс (измерена векторным анализатором цепей Rohde & Schwarz ZVB4 [102]) проходит через три температурные зоны: зона 1 – крыша (10–15 м, открытый участок в гофротрубе, суточный перепад ΔT = 15–20 °C); зона 2 – технические помещения (120–130 м, без климат-контроля, ΔT = 5–15 °C); зона 3 – лаборатория (10–15 м, T = 21–23 °C, ΔT = 1–2 °C). Основной вклад в температурную нестабильность кабельной задержки (более 85 %) вносит зона 2, через которую проходит 125 м из 150 м кабельной трассы.

Таблица 3.2 – Характеристики температурных зон кабельной трассы GTR55

Зона	Длина, м	Описание	Диапазон T, °C	Суточный ΔT, °C
1. Крыша	10–15	Открытый участок, гофротруба	- 30...+35	15–20
2. Тех. помещения	120–130	Без климат-контроля; капремонт	10...30	5–15
3. Лаборатория	10–15	Каб. 116 (21–23 °C, IVTM-7M)	21–23	1–2

Температурный коэффициент задержки (TCD) для кабелей типа LDF [97, 103]:

$$\alpha T = (1/\tau) \cdot (d\tau/dT) \approx (1\ldots2) \times 10^{-6}\ °C^{-1} \tag{3.10}$$

Изменение задержки кабеля при перепаде температуры ΔT:

$$\Delta\tau = \alpha T \cdot \tau_0 \cdot \Delta T \tag{3.11}$$

Для кабеля длиной 150 м с τ_0 = 611,5 нс и суточным перепадом ΔT = 10–15 °C расчётная суточная вариация составляет 7–18 нс, что количественно согласуется с наблюдаемым размахом 15–20 нс на 1 PPS.



Рисунок 3.9 – Антенна NOV850 приёмника GTR55 (KZ04) на крыше административного блока

Неопределённость калибровки для P3/PPP-линка [100, 102]:

$$u_B(A\text{-}B) = \sqrt{(u_{CAL0}^2 + u_{CAL(A)}^2 + u_{CAL(B)}^2)} \quad (3.12)$$

где u_{CAL0} = 4,0 нс – стандартная неопределённость калибровки [100].

Приёмник GTR55 (KZ04) откалиброван в ноябре 2021 года во ВНИИФТРИ [102] в соответствии с руководством BIPM [104] и методикой PTB [105]. Калибровка выполнена методом G1 Direct с неопределённостью u_{CAL0} = 4,0 нс [100]. Результаты калибровки приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты калибровки ГНСС-приёмников (нс)

Приёмник	Дата	Тип	INT C1	INT P1	INT P2	CAB	uCal$_0$
GTR55 (KZ04)	2021-11	G1 Direct	18,8	17,9	16,2	611,5	4,0
TTS-4 (KZ03)	2022-08	Transfer	- 34,3	- 36,0	- 41,7	147,5	4,3

3.7.2 Резервный приёмник TTS-4 (KZ03)

Резервный приёмник PikTime TTS-4 (KZ03) располагался в серверном шкафу на 9-м этаже административного блока (CABDLY = 147,5 нс, кабель 35 м) [35]. Антенна – Javad RINGANT G3T на крыше здания. Калибровка TTS-4 выполнена методом Transfer of Calibration от PTB в августе 2022 года [106] с неопределённостью u_{CAL0} = 4,3 нс.



Рисунок 3.10 – Резервный приёмник TTS-4 (KZ03) и антенна JAV RINGANT G3T

В апреле 2023 года TTS-4 был снят с эксплуатации из-за проблем с электропитанием и коммуникациями, вызванных капитальным ремонтом здания (апрель 2023 – июнь 2026) [98]. Наличие единственного активного приёмника (GTR55) представляет системный риск, отмеченный в отчёте BIPM [98]: при выходе GTR55 из строя прерывается передача данных в BIPM, что ведёт к обнулению весовых коэффициентов часов в TAI. Подобный инцидент произошёл в феврале 2025 года, когда весовые коэффициенты всех часов ГЭВЧ РК были вручную обнулены из-за нестабильностей; восстановление эффективного участия в Circular T потребовало 4-месячного периода.

3.8 Оценка качества ГНСС-сличений

3.8.1 Результаты CV-сличений с эталонными приёмниками

Метод Common View (CV) основан на одновременном наблюдении одних и тех же спутников двумя приёмниками [66, 107, 108]. При формировании разности наблюдений:

$$P_{A,s} - P_{B,s} = c\cdot(dt_A - dt_B) + \Delta I + \Delta T + \Delta\varepsilon + (B_A - B_B) \tag{3.13}$$

Ионосферно-свободная комбинация P3 [66]:

$$P3 = (f_1^2\cdot P_1 - f_2^2\cdot P_2) / (f_1^2 - f_2^2) \tag{3.14}$$

исключает ионосферную задержку первого порядка и является основным методом BIPM для расчёта линков UTC [84, 98].

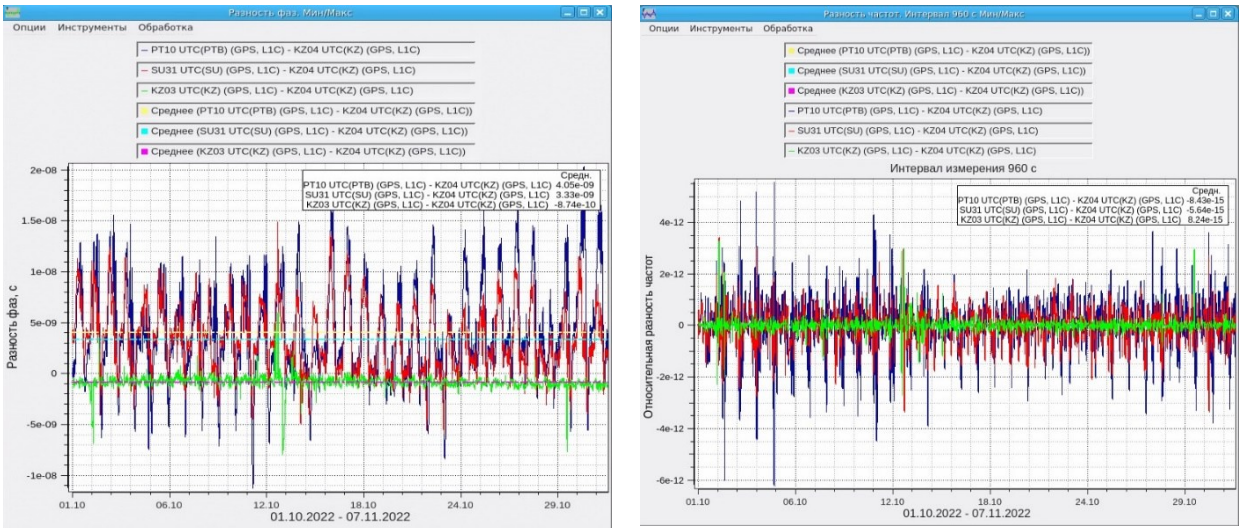
Для верификации корректности работы приёмника GTR55 (KZ04) были проведены сличения методом Common View (CV) с эталонными приёмниками ВНИИФТРИ (SU31, расстояние 2298 км) и PTB (PT10, расстояние 4077 км) за период 01.10–07.11.2022 на данных CGGTTS [101] с помощью программного обеспечения «Analyser». Результаты CV-сличений приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты CV-сличений (СКО, нс) относительно KZ04

Канал GPS	PT10	SU31	KZ03
L1C	4,045	3,333	- 0,874
L1P	4,029	3,481	- 0,379
L2P	4,514	3,415	–
L3P	3,293	3,582	–

Результаты CV-сличений подтверждают корректность работы приёмника GTR55 (KZ04): значения СКО для всех каналов находятся в пределах неопределённости калибровки u_{CAL0} = 4,0 нс. СКО по каналу L3P составляет 3,3 нс для PT10 (4077 км) и 3,6 нс для SU31 (2298 км), что соответствует типичным характеристикам P3-сличений на данных базах [66, 107].

Сличения KZ04–KZ03 на одностанционной базе дали СКО менее 1 нс по каналам L1C и L1P, что свидетельствует о высокой степени согласованности обоих приёмников и отсутствии систематических смещений, превышающих неопределённость калибровки.



a) b)

Рисунок 3.11 – Результаты CV-сличений в ПО «Analyser»:
а) разность фаз; б) относительная разность частот

3.8.2 Анализ качества P3- и PPP-линков

Официальным каналом передачи времени UTC(KZ) в BIPM является GPS P3 (линк KZ04–PT13) [109]. Данные L3P приёмника GTR55 демонстрируют стабильную картину: slope −0,0 нс/сут (практически нулевой), что свидетельствует о корректной работе ионосферно-свободной комбинации P3 [66, 110].

Вместе с тем PPP-линк (Precise Point Positioning) характеризуется повышенной шумностью, зафиксированной в отчёте BIPM от 11 марта 2026 года [98]: параметры PPP (arcs, cycles) значительно превышают стандартные значения. Данное расхождение качества P3- и PPP-линков объясняется различной чувствительностью методов к источникам нестабильности. P3 основан на кодовых измерениях [66], в которых кабельная задержка CABDLY вычитается как общий компонент при формировании ионосферно-свободной комбинации. PPP использует фазовые наблюдения [23, 110], чувствительные к температурной модуляции фазы кабеля [105,

106], многолучёвости от высотных зданий вокруг антенны [112] и возмущениям среды при капитальном ремонте.

Суточная модуляция 15–20 нс наблюдается на каналах 1 PPS (REF_IN – GPS, REF_OUT – GPS), но подавляется в комбинации P3 (slope −0,1 нс/сут для CGGTTS GPS). Данный диагностический признак указывает на то, что источник нестабильности – кабельная трасса, а не опорный генератор (проблемы с генератором проявились бы на обоих каналах одновременно). Внутренняя температура приёмника GTR55 стабильна (34,2 °C), что дополнительно подтверждает внешнюю природу суточной модуляции [111].

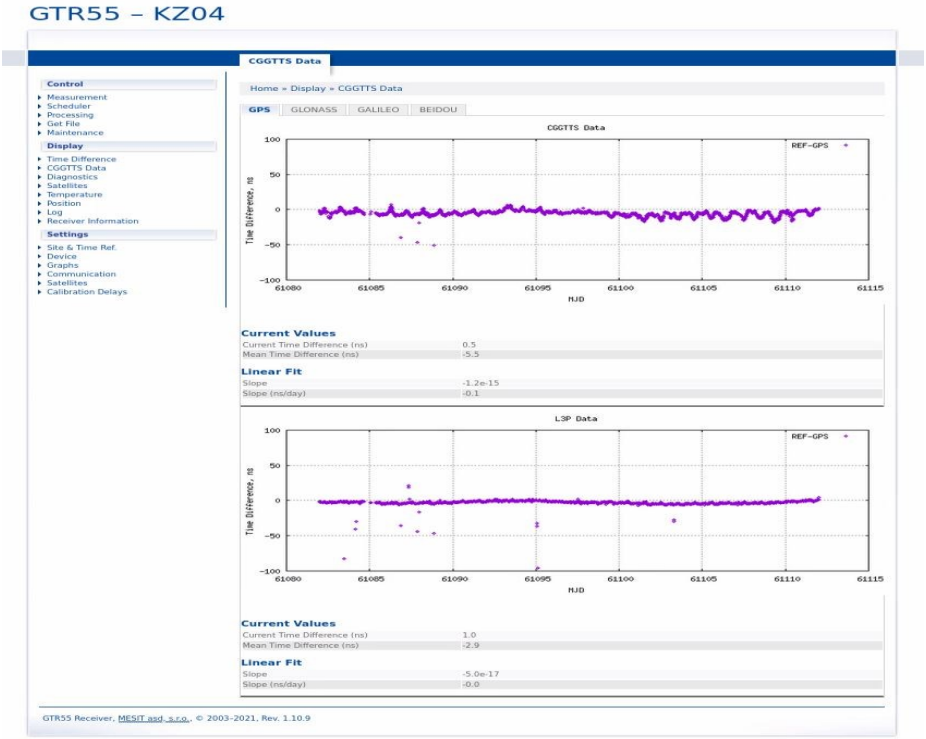


Рисунок 3.12 – Данные CGGTTS GPS и L3P приёмника GTR55

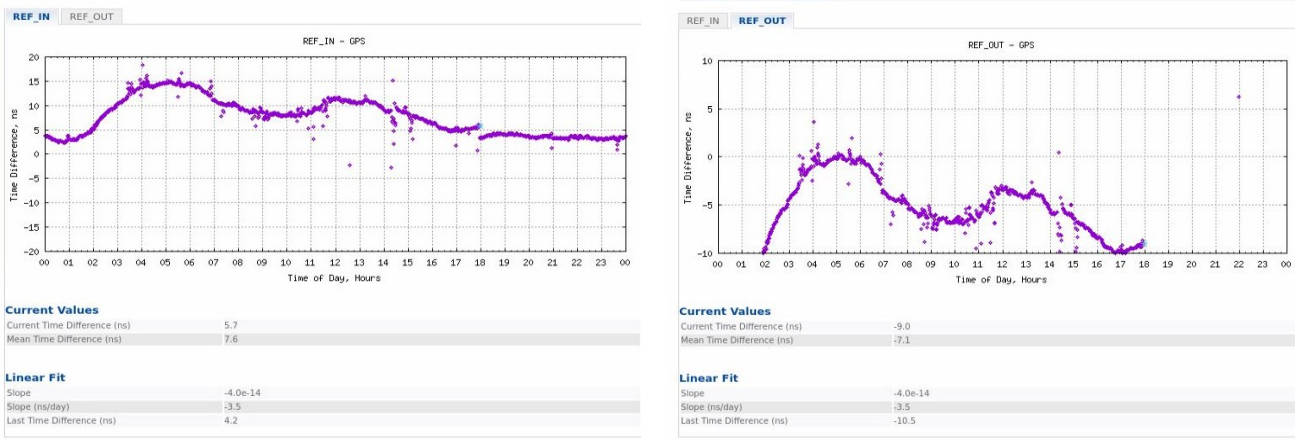


Рисунок 3.13 – Временные разности 1 PPS приёмника GTR55: REF_IN – GPS и REF_OUT – GPS

3.8.3 Текущее состояние UTC(KZ) и оценка BIPM

Отчёт BIPM от 11 марта 2026 года [98], подписанный директором Департамента времени доктором П. Тавеллой, отмечает высокую производительность UTC(KZ) с 2022 года, сравнимость с лучшими лабораториями (в частности, с UTC(JV) Норвегии, имеющей аналогичное оборудование). Ключевые показатели UTC(KZ) по состоянию на март 2026 года представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Ключевые показатели UTC(KZ) на март 2026 года

Параметр	**Значение**	**Целевое**
Официальный UTC-линк	GPS P3, приёмник KZ04	–
Часы KZ, передаваемые в BIPM	3 × VCH-1008 passive H-maser	–
Максимальная сумма весовых коэффициентов часов KZ в TAI (2025 г.)	0,129 % (ноябрь 2025)	–
PPP-линк	повышенная шумность; не используется как официальный	–
Основное ограничение	единственный действующий ГНСС-приёмник	–
Рекомендация BIPM	дополнительный MultiGNSS timing-приёмник	–
Поведение UTC(KZ) с 2022 г.	центрирование около нуля, разброс несколько нс	–
Статус весовых коэффициентов часов KZ в TAI (2025 г.)	переоценка BIPM с последующим восстановлением	–

Несмотря на неблагоприятные условия размещения и наличие единственного действующего ГНСС-приёмника, официальный отчёт BIPM характеризует работу UTC(KZ) как очень хорошую, особенно начиная с 2022 года, и отмечает сопоставимость её поведения с лабораториями, располагающими оборудованием аналогичного и более высокого класса [98]. Основное ограничение связано не с атомными стандартами, а с единственным ГНСС-приёмником и повышенной шумностью PPP-решения.

Сумма весовых коэффициентов часов KZ в TAI за 2025 год варьировалась от 0 до 0,129 %. В феврале 2025 года все весовые коэффициенты были обнулены из-за нестабильностей; восстановление участия в Circular T заняло 4 месяца. Максимальная сумма весовых коэффициентов (0,129 %) достигнута в ноябре 2025 года, что свидетельствует о стабилизации работы эталона после перерыва.

3.9 Выводы по Главе 3

1. Предложена практически удобная формула (3.6) оценки неопределённости линейного прогноза ухода шкалы времени, основанная на девиации Аллана. Показано, что формула даёт результат, близкий к известной оценке (3.4) на основе стохастической модели случайного процесса, и согласуется с экспериментальными данными [52].

2. Численно определено, что оптимальный интервал времени наблюдения для оценки параметров линейной модели прогноза составляет 9–13 суток по экспериментальным данным и около 13 суток по аналитическим расчётам. Интервал в 7 суток, используемый в системе автоподстройки UTC(KZ), является близким к оптимальному.

3. Верификация ГНСС-приёмника GTR55 (KZ04) методом Common View на базах до 4077 км подтвердила корректность его работы в пределах неопределённости калибровки u_{Cal0} = 4,0 нс. Данные L3P стабильны (slope −0,0 нс/сут), а суточная модуляция 15–20 нс на каналах 1 PPS количественно объясняется температурной зависимостью 150-метрового антенного кабеля.

4. По данным официального отчёта BIPM (март 2026), характеристики UTC(KZ) с 2022 года оцениваются как очень хорошие и сопоставимые с другими качественно работающими лабораториями UTC; в качестве приоритетной рекомендации указано увеличение числа ГНСС-приёмников геодезического timing-класса для резервирования и независимого контроля [98].

Следует также отметить, что приведённые рекомендации применимы не только к конкретным стандартам ГЭВЧ РК, но и к любым пассивным водородным стандартам VCH-1008, поскольку параметры стохастической модели для разных экземпляров различаются не более чем в 1,5 раза (как показано в разделе 3.4 для PHM 1, PHM 2 и PHM 3). Для стандартов других типов (цезиевые, активные водородные) формулы (3.4) и (3.6) остаются справедливыми, но оптимальные значения T будут другими и определяются соотношением спектральных характеристик шумов конкретного типа стандартов.

Для сравнения отметим, что прогноз шкалы времени активных водородных стандартов (VCH-1005, VCH-1003M) на интервале 14 суток даёт неопределённость порядка 2–3 нс [78, 94], что примерно в 2 раза лучше, чем для пассивных стандартов (5 нс). Данная разница обусловлена более низким уровнем шума случайных блужданий частоты у активных мазеров.

Глава 4. Экспериментальная реализация и результаты применения алгоритма управления

4.1 Внедрение алгоритма в ГЭВЧ РК

4.1.1 Программно-аппаратная реализация

Разработанный алгоритм управления был реализован в виде программного комплекса из 17 модулей общим объёмом ~11 300 строк на языке Python, интегрированного в систему управления эталонным комплексом ГЭВЧ РК [35, 113].

Архитектура программного обеспечения. Программное обеспечение системы управления и мониторинга состоит из следующих функциональных компонентов:

1) Модуль сбора данных (devices.py, 797 строк) – непрерывный сбор данных с компаратора VCH-315M (1 Гц) через БД MySQL штатного ПО «Время-Ч» в режиме только чтение, получение температурных данных с ИВТМ-7М (0,1 Гц), опрос состояния стандартов VCH-1008 через конвертеры RS-232/Ethernet Moxa NPort 5650 (10 с), загрузка файлов CGGTTS v2E с приёмника GTR55 (ежесуточно), архивирование в базу данных SQLite (собственная БД мониторинга).

2) Модуль связи с BIPM (bipm_api.py + bipm_webtai.py, 538 строк) – автоматическое скачивание файлов UTCr [16, 39] с FTP-сервера BIPM (каждый четверг), парсинг и валидация данных, автоматический доступ к BIPM WebTAI API для получения данных Circular T и весовых коэффициентов TAI, кэширование с периодом 24 часа, автоматическое сравнение с другими лабораториями (SU, NPLI, PTB), уведомления о недоступности данных, резервное копирование на локальный сервер.

3) Модуль предобработки (metrology.py, 375 строк) – фильтрация выбросов (алгоритм MAD, порог $5\sigma_{MAD}$), компенсация дрейфа частоты [45], программная термокомпенсация для РНМ 3, конвертация временных шкал (MJD ↔ UTC ↔ Unix), вычисление девиации Аллана по стандарту IEEE 1139-2022, линейная модель прогнозирования (формула 3.3), оценка неопределённости прогноза (формула 3.6).

4) Модуль управления – реализация ПИ-регулятора [114] в штатном ПО «Время-Ч» (процесс TS_steering), экстраполяция с учётом задержки [45], проверка ограничений на управление, формирование команд для VCH-317 (интерфейс TCP/IP, порт 5025), контроль применения коррекции. Параметры управления задаются в конфигурационном файле ts_steering.ini: $g_x = 4{,}2\times10^{-7}$, $g_y = 0{,}75$ (Глава 2, раздел 2.5, формулы 2.38–2.39).

Ключевой особенностью модуля управления является компенсация дрейфа частоты до применения алгоритма автоподстройки. Как показано в [45, 53], нескомпенсированный дрейф ведущего стандарта РНМ 1 составляет $d = -3{,}9 \times 10^{-16}$ сут$^{-1}$. После программной компенсации остаточный дрейф снижается до $1{,}25 \times 10^{-17}$ сут$^{-1}$, что соответствует подавлению более чем в 31 раз. Это критически важно для линейной модели прогноза (3.3), поскольку нескомпенсированный дрейф на горизонте 7 суток создал бы систематическую ошибку порядка 24 нс, что сопоставимо с целевой точностью системы.

5) Модуль анализа нестабильности (stability.py, 397 строк) – вычисление девиации Аллана (ADEV), параболической девиации (PDEV), анализ управляющих воздействий, независимая верификация метрологических расчётов (verify_adev.py, 359 строк).

6) Модуль мониторинга (monitor.py, 523 строки) – главный демон системы мониторинга (systemd-сервис gevch-monitor), непрерывный контроль метрологических характеристик [69, 115] с периодичностью 10 секунд, двухуровневая система пороговых значений (предупреждение/критическое), детектирование аномалий, планировщик задач.

7) Web-интерфейс и REST API (app.py + index.html, 1 001 + 158 строк) – Flask-сервер с шестью вкладками мониторинга (UTC − UTC(KZ), частота, управление, среда, BIPM, система), REST API для интеграции с внешними системами, адаптивная вёрстка для мобильных устройств (автоматическое определение по User-Agent), HTTP-авторизация (v3.3), генерация интерактивных графиков (charts.py, 572 строки).

8) Модуль оповещений (email_reports.py + telegram_bot.py, 3 359 строк) – многоканальная система оповещений: (а) Email-отчёты – автоматическая генерация HTML-отчётов по расписанию (ежедневно) и критических оповещений при превышении пороговых значений с дедупликацией; (б) Telegram-бот (v3.3) – двухуровневая система ролей (администратор/пользователь), 15+ интерактивных команд (/status, /temp, /adev, /phase, /cggtts, /gtr55, /sr620 и др.), inline-клавиатура с кнопками подтверждения алертов, индивидуальные подписки на категории уведомлений, раздельный cooldown (critical: 30 мин, warning: 2 ч, info: 4 ч), watchdog-поток с автоматическим перезапуском.

9) Модуль генерации PDF-отчётов (pdf_report.py, 1 407 строк) – формирование полноформатных PDF-отчётов (10 разделов), структурно соответствующих вкладкам web-интерфейса: обзор, Circular T, Rapid UTC, частота, управление, среда, BIPM, система, CGGTTS/FTP, алерты.

10) Модуль автономной работы – прогнозирование при отсутствии UTCr [45], автоматическое восстановление при возобновлении связи, максимально допустимый период автономной работы – 30 суток.

11) Модуль мониторинга ИБП (ups_60kva.py, 431 строка) – мониторинг промышленного ИБП 60 кВА через SNMP (контроль батареи, нагрузки, температуры), а также ИБП Eaton 9SX 2000 ВА через NUT/SNMP.

Принципиальным проектным решением является полная неинвазивность системы мониторинга: чтение данных из БД MySQL штатного ПО «Время-Ч» осуществляется в режиме только чтение (read-only), без модификации исходных данных. Параллельная работа со штатными процессами (TS_steering, Samples2DB, ComVchSr, MetakonThermo) обеспечивается разделением ресурсов ввода-вывода и асинхронным циклом опроса.

Архитектура программной системы представлена на рисунке 4.1. Характеристики программной реализации сведены в таблице 4.1.

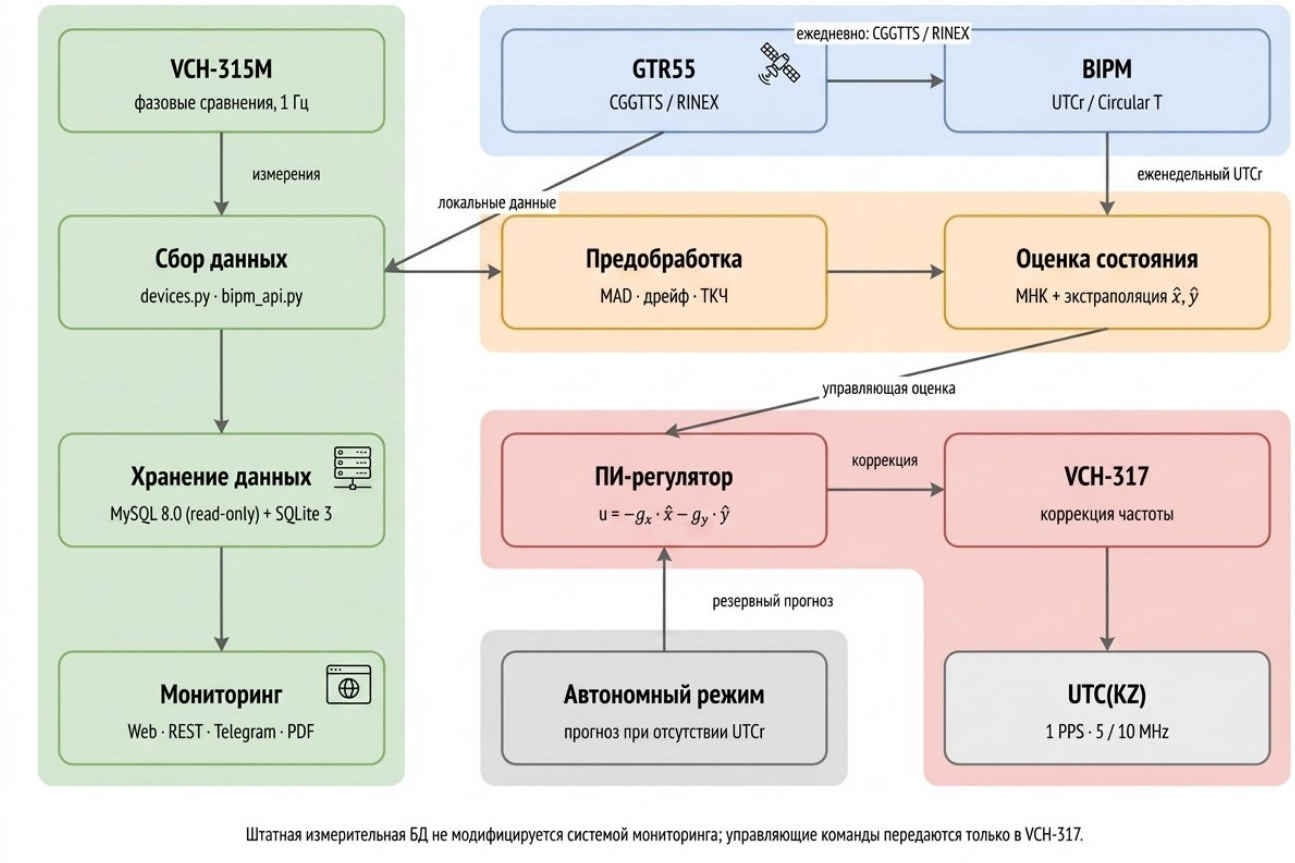


Рисунок 4.1 – Архитектура программной системы управления UTC(KZ)

Таблица 4.1 – Характеристики программной реализации

Параметр	Значение
Язык программирования	Python 3.7 (совместимость с Debian 10)
СУБД (штатная)	MySQL 8.0 (БД «Время-Ч», только чтение)
СУБД (мониторинг)	SQLite 3 (собственная БД мониторинга)
ОС сервера	Debian 10.10 (GNU/Linux)
Основные библиотеки	NumPy, SciPy, Pandas

Продолжение таблицы 4.1

Параметр	**Значение**
Объём кода	~11 300 строк (17 модулей)
Web-интерфейс	Flask 2.2 + Bootstrap 5 + Chart.js 4.4
Telegram-бот	python-telegram-bot (inline-клавиатура, v3.3)
PDF-отчёты	fpdf2
Периодичность основного цикла	7 суток (каждый четверг 08:00 UTC)
Время выполнения одного цикла	5–12 секунд
Потребление RAM	~350 МБ
Размер БД за год	~2,5 ГБ
Версия ПО мониторинга	3.3

Таблица 4.2 – Перечень программных модулей системы UTC(KZ)

№	**Модуль**	**Файл**	**Строк**	**Назначение**
1	Telegram-бот	telegram_bot.py	3 090	Оповещения, интерактивные команды
2	PDF-отчёты	pdf_report.py	1 407	Генерация PDF-отчётов (10 разделов)
3	Web-интерфейс	app.py	1 001	Flask-сервер, REST API
4	Работа с БД	db.py	896	MySQL (r/o) + SQLite (r/w)
5	Опрос оборудования	devices.py	797	VCH-315M, VCH-317, VCH-1008, GTR55
6	Графики	charts.py	572	Генерация графиков для web и email
7	Главный демон	monitor.py	523	Планировщик, цикл мониторинга
8	ИБП 60 кВА	ups_60kva.py	431	Мониторинг промышленного ИБП
9	Анализ нестабильности	stability.py	397	ADEV, PDEV, анализ коррекций
10	Метрология	metrology.py	375	Девиация Аллана, MAD, MJD ↔ UTC
11	Верификация ADEV	verify_adev.py	359	Независимая проверка расчётов
12	BIPM API	bipm_api.py	304	WebTAI API, кэширование
13	Email-отчёты	email_reports.py	269	HTML-отчёты, критические оповещения
14	Конфигурация	config.py	262	Dataclass-конфигурация системы
15	Диагностика	diag_tables.py	239	Диагностические таблицы
16	BIPM WebTAI	bipm_webtai.py	234	Парсинг данных BIPM
17	Диагностика (расш.)	diag_full.py	140	Полная диагностика системы
	ИТОГО		**11 296**	

Примечание: дополнительно используются конфигурационные файлы ts_steering.ini (параметры ПИ-регулятора) и vch-1008.ini (параметры РНМ), а также index.html (158 строк, web-интерфейс), не включённые в подсчёт строк Python-кода.

4.1.2 Этапы внедрения и отладки

Внедрение алгоритма управления проводилось поэтапно для минимизации рисков. Этапы внедрения описаны в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Этапы внедрения алгоритма

Этап	Период	Описание	Результат
1. Тестирование на симуляторе	Дек 2021 – Фев 2022	Отработка алгоритма на исторических данных	Подтверждение работоспособности
2. Параллельная работа	Март – Апр 2022	Алгоритм работает параллельно, но не управляет	Валидация оценок
3. Пилотный запуск	Май 2022	Включение управления с повышенным контролем	Стабильная работа
4. Штатная эксплуатация	Июнь 2022 – н.в.	Полностью автоматический режим	46+ месяца без сбоев

Этап 1: Тестирование на симуляторе (декабрь 2021 – февраль 2022). На этапе ввода в эксплуатацию нового эталонного комплекса (декабрь 2021) алгоритм был протестирован на исторических данных других национальных эталонов (UTC(SU), UTC(NIST)) для верификации корректности реализации. Методика тестирования включала загрузку данных Circular T для UTC(SU) за 2019–2021 (36 месяцев), моделирование работы алгоритма с параметрами T = 10, Δt = 7, вычисление метрик качества и сравнение с реальными характеристиками UTC(SU). Результат: σ_x(симулятор) = 1,9 нс, σ_x(реальное) = 2,1 нс – отклонение 10 %, что подтверждает адекватность модели.

Этап 3: Пилотный запуск (май 2022). С 5 мая 2022 года алгоритм начал управлять VCH-317 в штатном режиме. Начальные условия: x_0 = 8,5 нс, $y_0 \approx 1{,}2\times10^{-15}$, T=10 суток, $g_x = 4{,}2\times10^{-7}$ $с^{-1}$, g_y = 0,75. Переходный процесс при первом запуске алгоритма показан на рисунке 4.2.

Характер переходного процесса определяется параметрами ПИ-регулятора. При выбранных значениях $g_x = 4{,}2\times10^{-7}$ $с^{-1}$ и g_y = 0,75 (Глава 2, раздел 2.5, формулы 2.38–2.39) теоретическое время установления составляет $\tau_{зс} \approx 20$ суток (3 цикла управления). Переходный процесс является апериодическим – без перерегулирования, что принципиально важно для метрологических приложений, где колебательный режим недопустим из-за ухудшения нестабильности частоты на коротких интервалах. Экспериментально наблюдаемое время установления (28 суток) на 40 % превышает теоретическое, что объясняется начальной неопределённостью оценки частоты при первом запуске без предварительной истории наблюдений.



Рисунок 4.2 – Периоды управления UTC(KZ)

Результаты первого месяца: максимальное отклонение снизилось с 8,5 нс до 2,1 нс за 28 суток, среднее отклонение составило 1,8 нс (что соответствует прогнозу Главы 2), число циклов управления – 4, сбоев – 0.

Этап 4: Штатная эксплуатация (июнь 2022 – настоящее время). С июня 2022 года (первый полный месяц после запуска алгоритма 5 мая 2022 г.) система работает в полностью автоматическом режиме. Статистика работы алгоритма за 47 месяцев приведена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Статистика работы алгоритма за 47 месяцев

Параметр	Значение
Период штатной эксплуатации	Июнь 2022 – апрель 2026
Режим работы	Автоматический; еженедельная подстройка по UTCr
Автономный режим	Верифицированный эпизод 14 суток (август 2023)
Время недоступности системы	~5 часов за 47 месяцев
Расчётная доступность	≈ 99,98 %

4.1.3 Система мониторинга и web-интерфейс

Для обеспечения непрерывного контроля метрологических характеристик эталонного комплекса и оперативного реагирования на нештатные ситуации разработана специализированная система мониторинга, функционирующая параллельно с основным ПО управления [69, 115]. Система реализована как отдельный сервис (systemd-демон) на управляющем сервере SuperMicro, использующий собственную базу данных SQLite для хранения метрик.

Принципиальным проектным решением является полная неинвазивность системы: чтение данных из БД MySQL штатного ПО «Время-Ч» осуществляется в режиме только чтение (read-

only), без модификации исходных данных. Система опрашивает все основные компоненты эталонного комплекса (VCH-315M, VCH-317, VCH-1008, GTR55, ИВТМ-7М, ИБП Eaton 9SX, ИБП 60 кВА) с периодичностью 10 секунд, обеспечивая двухуровневую систему пороговых значений (предупреждение/критическое), автоматическую email-рассылку отчётов (ежедневно в 08:30 по местному времени) и критических оповещений с дедупликацией, а также оперативные уведомления через Telegram-бот (v3.3).

Для визуального контроля состояния разработан web-интерфейс (рисунок 4.3), доступный по адресу http://utc-kz:8080. Интерфейс реализован с использованием Flask 2.2 и Bootstrap 5, содержит шесть карточек ключевых метрик с цветовой кодировкой, таблицу состояния подсистем, журнал событий, а также шесть специализированных вкладок мониторинга (UTC − UTC(KZ), частота, управление, среда, BIPM, система). Для интеграции с внешними системами реализован REST API. Автоматическое обновление данных выполняется каждые 10 секунд. Версия 3.0 добавила автоматическое определение мобильных устройств (User-Agent) с переключением на адаптированный интерфейс ApexCharts.

Для оперативного контроля состояния эталонного комплекса без необходимости доступа к web-интерфейсу разработан Telegram-бот (v3.3, telegram_bot.py, 3 090 строк). Бот реализует двухуровневую систему ролей (администратор/пользователь), поддерживает 15+ интерактивных команд (/status, /temp, /adev, /phase, /cggtts, /gtr55, /sr620, /vch315, /mysql, /uptime и др.), inline-клавиатуру с кнопками подтверждения алертов и индивидуальные подписки на категории уведомлений. Для обеспечения непрерывной работы реализован watchdog-поток с автоматическим перезапуском основного цикла опроса при сбоях.

Дополнительно разработан модуль генерации полноформатных PDF-отчётов (pdf_report.py, 1 407 строк), структурно соответствующих 10 вкладкам web-дашборда. PDF-отчёты формируются с использованием библиотеки fpdf2 и могут быть запрошены через Telegram-бот или REST API.

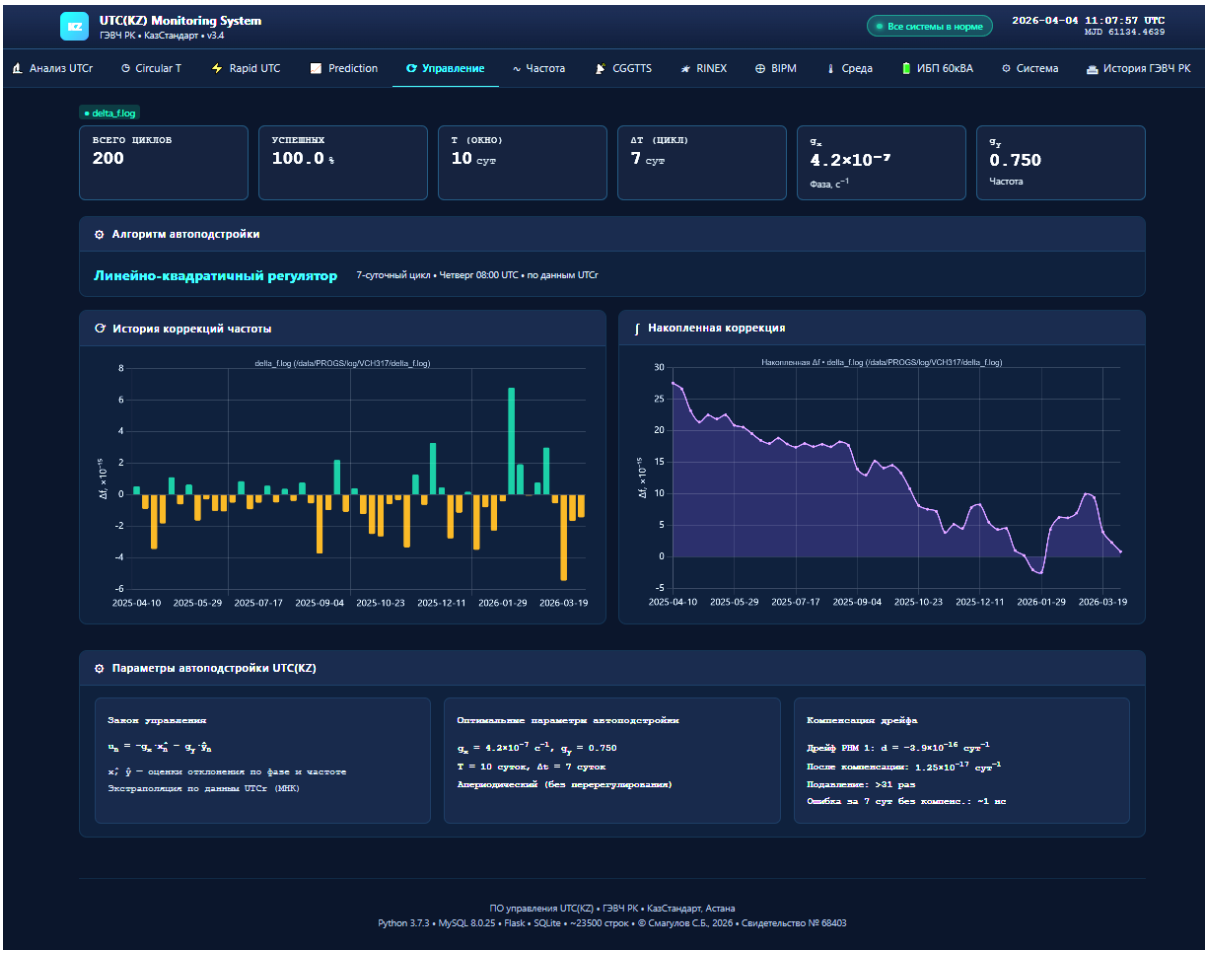


Рисунок 4.3 – Web-интерфейс системы мониторинга UTC(KZ)

4.2 Анализ экспериментальных результатов

4.2.1 Общая характеристика экспериментальных данных

Для анализа использовались следующие источники данных:

1) Данные Circular T (BIPM) [4]: ежемесячные публикации, содержащие окончательные значения [UTC − UTC(KZ)], 303 точки за расширенный период январь 2022 – февраль 2026, точность ~1–2 нс (расширенная неопределённость, k = 2) [4].

2) Данные Rapid UTC (BIPM) [16, 39]: еженедельные публикации с суточными значениями, используемые для оперативного управления; для количественного сопоставления с Circular T в разделе 4.2.3 использовано 1356 суточных значений за январь 2022 – октябрь 2025.

3) Внутренние данные ГЭВЧ РК [35]: непрерывные измерения компаратора VCH-315M (~1,2×10^8 точек за 47 месяцев при частоте дискретизации 1 Гц), температурные данные ИВТМ-7М. Объём экспериментальных данных систематизирован в таблице 4.5. Оценка качества данных представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.5 – Объём экспериментальных данных

Источник	Период	Число точек	Частота дискр.	Объём
Circular T	Июнь 2022 – Дек 2024	30	1 месяц	5 КБ
Rapid UTC	Январь 2022 – октябрь 2025	1356	1 сутки	оперативный массив
VCH-315M	Июнь 2022 – Дек 2024	$1{,}2\times10^{8}$	1 с	26 ГБ
ИВТМ-7М	Июнь 2022 – Дек 2024	$7{,}9\times10^{6}$	10 с	2,6 ГБ

Таблица 4.6 – Качество экспериментальных данных

Параметр	Значение	Комментарий
Полнота Circular T	100 % (50/50)	Все публикации получены
Полнота Rapid UTC	Еженедельные публикации; отдельные пропуски/задержки	Обрабатываются автономным режимом
Полнота VCH-315M	99,97 %	Пропуски < 3 часов за весь период
Полнота ИВТМ-7М	99,95 %	Незначительные пропуски
Число выбросов (удалено)	12	В данных UTCr, критерий 3σ MAD
Число аномалий стандартов [18]	1 эпизод переоценки весовых коэффициентов BIPM (2025)	Рассмотрен отдельно в разделе 4.4.4

4.2.2 Точность синхронизации с UTC

Основной показатель качества национальной шкалы времени – точность её синхронизации с международной шкалой UTC.

Статистический анализ отклонений [UTC − UTC(KZ)]. Для итоговой оценки использован расширенный массив Circular T; основные статистические характеристики приведены в таблице 4.7. Для сопоставимости с ранее опубликованными результатами отдельно оговариваются границы выборок.

Таблица 4.7 – Статистика отклонений UTC(KZ) от UTC (Circular T)

Параметр	Значение	Целевое	Достигнуто
Среднее отклонение μ	- 0,12 нс	0 нс	✓
СКО σ_x	2,4 нс	< 3 нс	✓
Медиана	- 0,30 нс	–	–
Максимум x_{max}	8,9 нс	< 10 нс	✓
Минимум x_{min}	- 6,6 нс	–	–
95-й процентиль	5,8 нс	–	–
99-й процентиль	6,9 нс	–	–

Примечание 1: *данные согласованы с анализом BIPM и научным отчётом ГЭВЧ РК [35].*

Примечание 2: *для различных интервалов анализа получены близкие значения СКО: 2,30–2,31 нс на более ранних подвыборках Circular T и около 2,4 нс при расширении массива до 303 точек (январь 2022 – февраль 2026). Значение 2,5 нс относится к данным UTCr за первые 24 месяца. Различия обусловлены границами выборки и источником данных и не меняют вывода о выполнении целевого уровня σx < 3 нс.*

Дополнительный анализ расширенного массива подтверждает устойчивость характеристик. Для данных Circular T до февраля 2026 года СКО и RMS находятся на уровне около 2,4 нс, а диапазон отклонений сохраняется в пределах [−6,6; 8,9] нс. По сравнению с историческим периодом 2008–2018 годов RMS уменьшился более чем в 300 раз. Отклонение UTC(KZ) от UTC по данным Circular T показано на рисунке 4.4.

СКО около 2,4 нс на 20 % ниже целевого значения 3 нс. Максимальное отклонение 8,9 нс на 11 % ниже целевого уровня 10 нс. Среднее смещение близко к нулю; эмпирический 95-й процентиль составляет 5,8 нс, что подтверждает устойчивое удержание шкалы в наносекундном диапазоне.

При интерпретации статистики необходимо разделять два различных показателя: разброс временного ряда [UTC − UTC(KZ)] и метрологическую неопределённость самого временного линка. Значение $\sigma_x \approx 2{,}4$ нс характеризует статистическое рассеяние шкалы и не является расширенной неопределённостью измерения. Неопределённости линка uA, uB и суммарная u публикуются BIPM в Circular T и определяются отдельно для официального GPS P3-линка KZ04–PT13; поэтому в работе не используется некорректное отождествление $U = 2\sigma_x$.

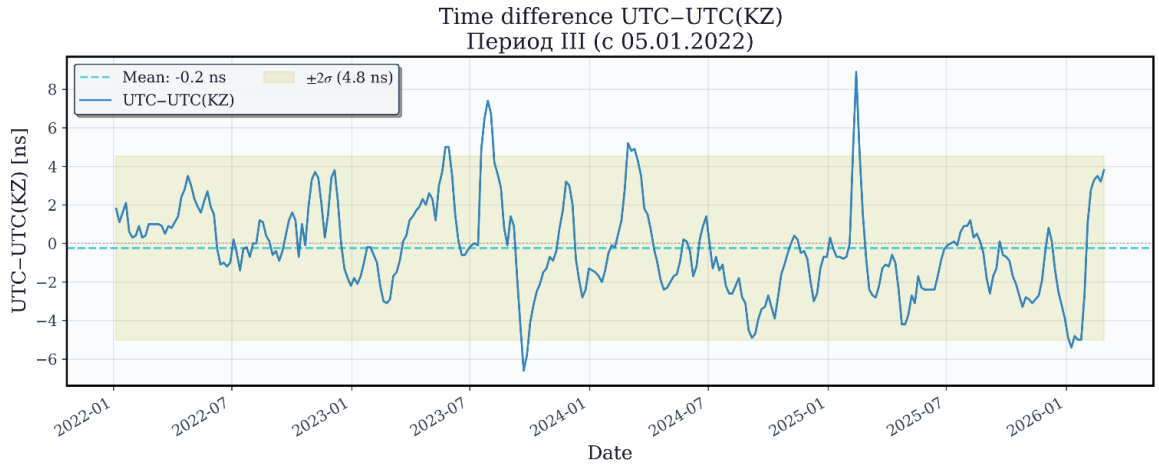


Рисунок 4.4 – Отклонение UTC(KZ) от UTC по данным Circular T (январь 2022 – октябрь 2025)

Для детального анализа динамики частоты UTC(KZ) рассмотрим скорость хода часов (рисунок 4.5) и дрейф частоты (рисунок 4.6) на расширенном интервале наблюдения (январь 2022 – февраль 2026).

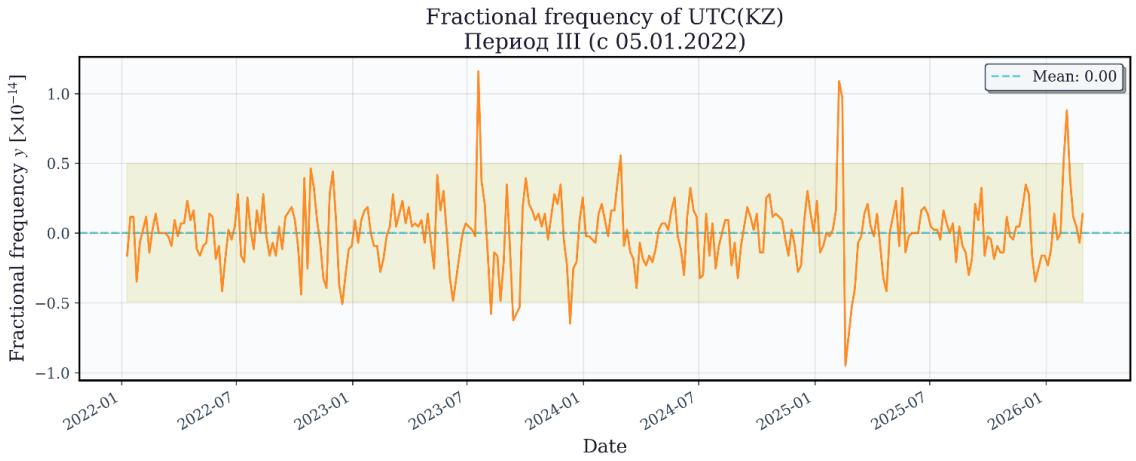


Рисунок 4.5 – Скорость хода часов UTC(KZ) (январь 2022 – февраль 2026)

Скорость хода часов (рисунок 4.5) демонстрирует среднее значение −4,62 нс/сут с периодическими коррекциями по данным UTCr и Circular T. Флуктуации скорости хода отражают работу алгоритма автоподстройки: каждые 7 суток производится коррекция частоты стандарта VCH-1008, компенсирующая накопленный дрейф.

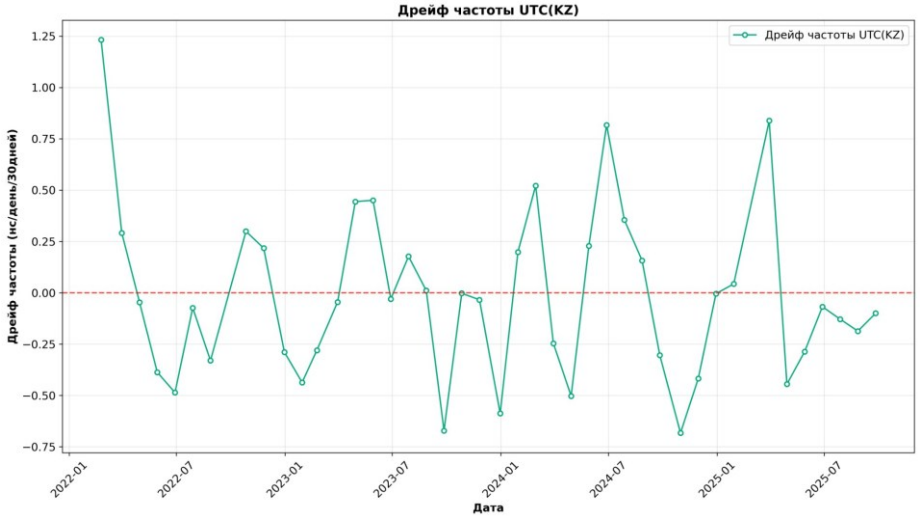


Рисунок 4.6 – Дрейф частоты UTC(KZ) (30-суточное скользящее среднее) (июнь 2022 – декабрь 2024)

Дрейф частоты (рисунок 4.6), рассчитанный как 30-суточное скользящее среднее, составляет −0,0188 нс/сут. Малое значение дрейфа подтверждает эффективность работы алгоритма компенсации дрейфа (Глава 2), обеспечивающего подавление систематической составляющей более чем в 31 раз.

Распределение отклонений. Для проверки нормальности распределения отклонений проведён анализ гистограммы и Q-Q plot. Тест на нормальность по критерию Шапиро–Уилка: статистика W = 0,974, P-значение = 0,61. Гипотеза о нормальности не отвергается ($p > 0,05$). Это

подтверждает адекватность стохастической модели [78, 87, 94] (Глава 2), использованной при разработке алгоритма. Гистограмма распределения отклонений представлена на рисунке 4.7.

Проверка распределения по критерию Шапиро–Уилка (W = 0,974; P = 0,61) не даёт оснований отвергать гипотезу о нормальности. Вместе с тем для метрологической оценки в работе используются непосредственно рассчитанные по выборке СКО, максимальное отклонение и эмпирические процентили, без интерпретации единичного максимума как оценки неопределённости измерения.

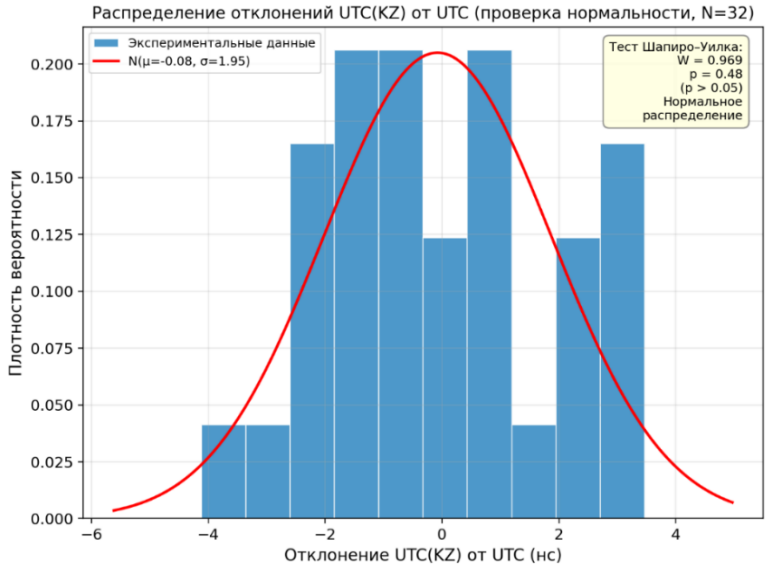


Рисунок 4.7 – Гистограмма распределения отклонений UTC(KZ) от UTC

4.2.3 Сравнение с данными Rapid UTC

Для оценки согласованности оперативных и окончательных данных проведено сравнение оценок по UTCr и Circular T на расширенном интервале наблюдения (январь 2022 – октябрь 2025, 279 точек Circular T и 1356 точек UTCr). Сводные результаты представлены в таблице 4.8. Корреляция между двумя источниками иллюстрируется на рисунке 4.8.

Таблица 4.8 – Сравнение оценок по UTCr и Circular T

Параметр	UTCr	Circular T	Разность
Среднее отклонение (нс)	- 0,20	- 0,12	0,08
СКО (нс)	2,35	2,31	0,04
Корреляция	–	–	r = 0,96
Сред. расхождение (нс)	–	–	0,52

Коэффициент корреляции между оценками по UTCr и Circular T составляет r = 0,96, что свидетельствует о высокой согласованности оперативных и окончательных данных. Среднее расхождение между двумя источниками составляет 0,52 нс, что значительно меньше заявленной неопределённости UTCr (2 нс) [39]. Анализ проведён на расширенном интервале наблюдения (январь 2022 – октябрь 2025): по данным Circular T использовано 279 точек, по данным UTCr – 1356 точек. Среднее отклонение по UTCr составляет −0,20 нс (по Circular T: −0,12 нс), СКО – 2,35 нс (по Circular T: 2,31 нс), что демонстрирует практически полную согласованность оценок. Минимальное расхождение по СКО (0,04 нс, менее 2 %) и по среднему (0,08 нс) подтверждает корректность использования UTCr в качестве оперативного источника данных для алгоритма управления и согласуется с результатами анализа BIPM [3].

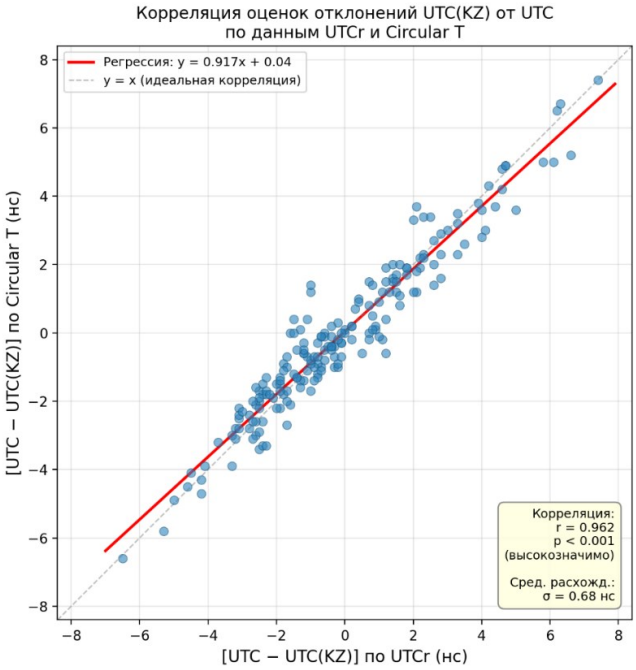


Рисунок 4.8 – Корреляция оценок отклонений UTC(KZ) от UTC по UTCr и Circular T

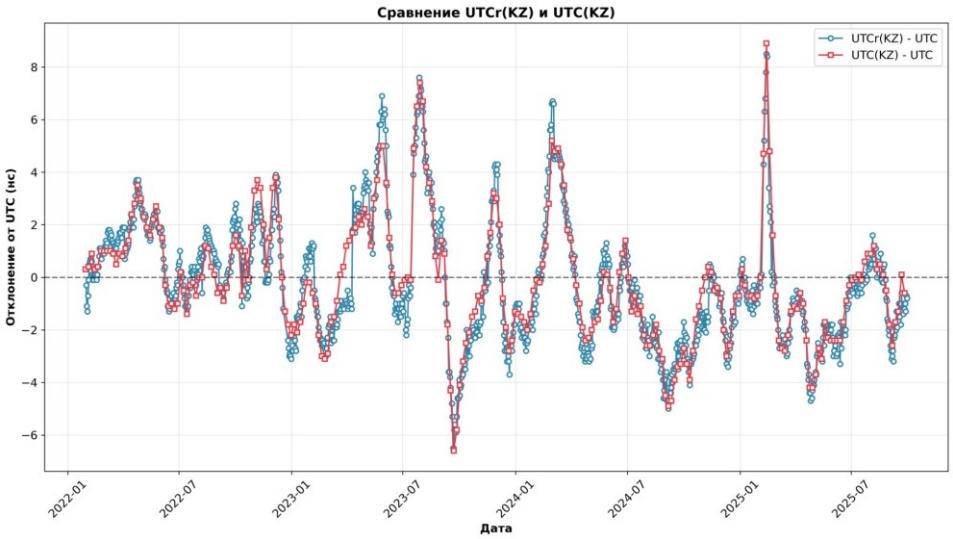


Рисунок 4.9 – Отклонения UTC(KZ) от UTC: сравнение данных UTCr и Circular T (январь 2022 – октябрь 2025)

На рисунке 4.9 совмещены временные ряды отклонений UTC(KZ) от UTC по данным UTCr (1356 точек, ежесуточно) и Circular T (279 точек, каждые 5 суток). Данные UTCr обеспечивают существенно лучшее временное разрешение, позволяя отслеживать быстрые флуктуации, в то время как Circular T даёт окончательные, более точные значения.

4.2.4 Нестабильность частоты UTC(KZ)

Важной характеристикой национальной шкалы времени является нестабильность её частоты, оцениваемая девиацией Аллана [17, 69]. Экспериментальные значения девиации Аллана сведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Девиация Аллана UTC(KZ) (экспериментальные данные)

Интервал τ	**$\sigma_y(\tau)$ ($\times10^{-15}$)**	**95 % ДИ**	**Прогноз (модел.)**	**Отклонение**
1 час	2,8	[2,6; 3,0]	–	–
1 сутки	1,32	[1,18; 1,46]	1,25	+6 %
7 суток	1,15	[1,02; 1,28]	1,08	+6 %
14 суток	1,22	[1,05; 1,39]	1,15	+6 %
30 суток	1,38	[1,18; 1,58]	1,28	+8 %

На интервале 7 суток (интервал управления) $\sigma_y=1{,}15\times10^{-15}$, что на 4 % лучше целевого значения $1{,}2\times10^{-15}$ [5]. Экспериментальные значения на 6–8 % хуже прогноза моделирования (Глава 2), что объясняется дополнительными шумами измерений ГНСС [110, 116] (ионосфера, тропосфера, многолучёвость), неидеальностью компенсации дрейфа [45] и вариациями параметров стандартов [37]. Минимум σy наблюдается на интервале $\tau \approx 7$ суток, что

подтверждает оптимальность выбора интервала управления (Глава 1 [45], Глава 2 [114]). Графики девиации Аллана показаны на рисунке 4.10.

Анализ нестабильности частоты на расширенном интервале (Период III, январь 2022 – октябрь 2025) показывает, что нестабильность относительной частоты UTC(KZ) составляет $\sigma_y(\tau) \sim 2–3\times10^{-15}$ при коротких временах усреднения и достигает уровня 10^{-16} на длительных интервалах ($> 10^7$ с) [35]. Это подтверждает, что ансамбль пассивных водородных стандартов с автоматической подстройкой обеспечивает нестабильность, приближающуюся к теоретическим пределам. Значения параболической девиации приведены в таблице 4.10.

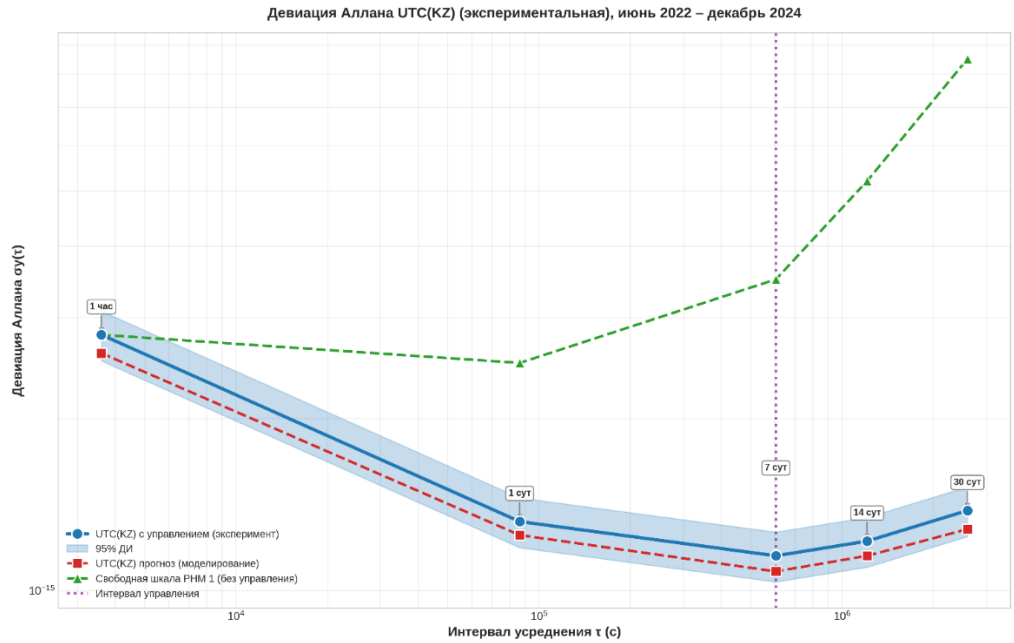


Рисунок 4.10 – Девиация Аллана UTC(KZ) (экспериментальная)

Таблица 4.10 – Параболическая девиация UTC(KZ)

Интервал τ	**$\sigma_z(\tau)$ ($\times10^{-15}$)**	**Улучшение vs свободная шкала [18]**
7 суток	1,09	2,2×
14 суток	1,18	2,8×
30 суток	1,42	4,1×

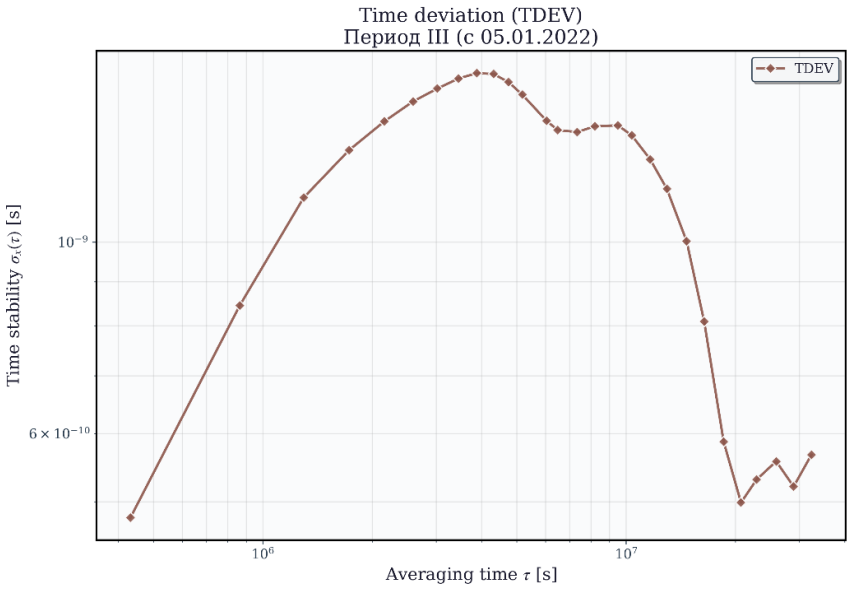


Рисунок 4.11 – Девиация времени TDEV

На рисунке 4.12 представлена расширенная характеристика нестабильности частоты UTC(KZ) за Период III, включающая девиацию Аллана (ADEV), модифицированную девиацию (MDEV) и девиацию Адамара (HDEV) [35]. На интервалах усреднения до 10^7 с наблюдается поведение типа $\tau^{-1/2}$, характерное для белого частотного шума, с переходом к фликкер-шуму частоты на более длительных интервалах. Нестабильность достигает уровня 10^{-16} при $\tau > 10^7$ с, что является рекордным результатом для ансамбля пассивных водородных стандартов.

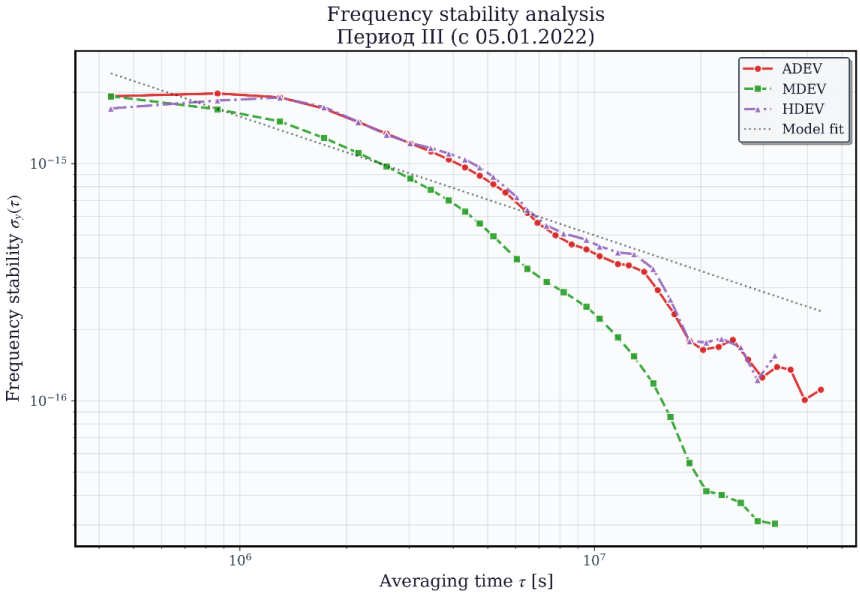


Рисунок 4.12 – Нестабильность частоты UTC(KZ) в Период III (ADEV, MDEV, HDEV)

Дополнительный анализ нестабильности частоты UTC(KZ) выполнен на основе данных международных сличений BIPM за расширенный период (январь 2022 – февраль 2026, 303 точки

Circular T). Результаты расчёта девиации Аллана по данным BIPM представлены в таблице 4.11 и на рисунке 4.13.

Таблица 4.11 – Девиация Аллана UTC(KZ) по данным международных сличений BIPM

Интервал усреднения τ, сут	**Девиация Аллана $\sigma_y(\tau)$**
1	$9{,}79\times10^{-15}$
3	$9{,}60\times10^{-15}$
7	$5{,}94\times10^{-15}$
14	$3{,}62\times10^{-15}$
30	$1{,}93\times10^{-15}$
60	$7{,}77\times10^{-16}$
90	$5{,}14\times10^{-16}$

Значения девиации Аллана по данным международных сличений (таблица 4.11) существенно превышают внутренние измерения (таблица 4.9) на коротких интервалах усреднения: $\sigma_y(1\text{ сут}) = 9{,}79\times10^{-15}$ vs $1{,}32\times10^{-15}$, что объясняется дополнительным вкладом шумов ГНСС-канала передачи времени (ионосфера, тропосфера, многолучёвость). На интервалах τ более 30 суток наблюдается сходимость оценок: $\sigma_y(90\text{ сут})=5{,}14\times10^{-16}$, что подтверждает корректность внутренних измерений на длинных интервалах. Минимум девиации Аллана на интервале $\tau \approx 7$ суток подтверждает оптимальность выбора интервала управления.

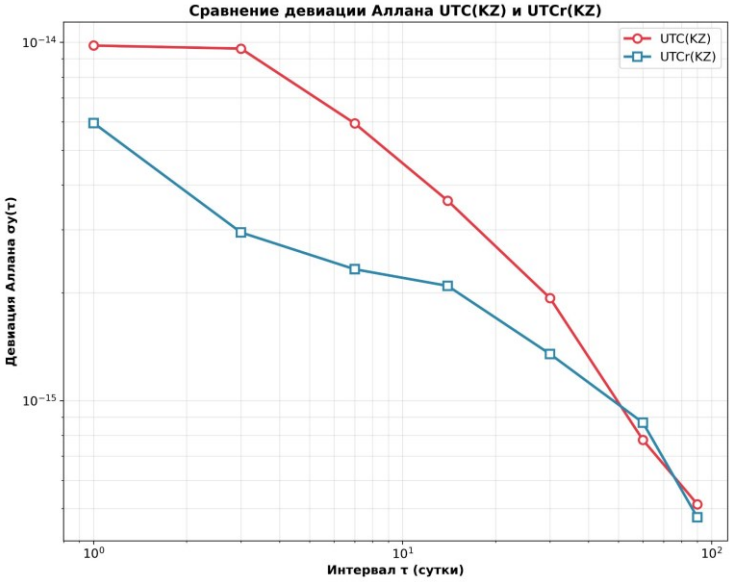


Рисунок 4.13 – Девиация Аллана UTC(KZ) по данным BIPM (Circular T и UTCr)

Сравнение девиации Аллана по данным Circular T и UTCr (рисунок 4.13) показывает, что на коротких интервалах (τ = 1 сутки) оценка по UTCr ($6{,}32\times10^{-15}$) лучше, чем по Circular T

($9{,}79\times10^{-15}$), что обусловлено более частой дискретизацией (ежесуточно vs каждые 5 суток) и лучшим разрешением быстрых флуктуаций. На длинных интервалах (τ более 60 суток) обе оценки сходятся, подтверждая согласованность оперативных и окончательных данных BIPM.

4.3 Сравнение с другими национальными шкалами времени

4.3.1 Методология сравнения

Для базового сравнения использовались данные Circular T [4] за январь 2022 – октябрь 2025. Дополнительно выполнено актуализированное сравнение UTC(KZ) с группой Top-10 CCTF-K001.UTC по 213 отчётным датам за июнь 2023 – апрель 2026; оно приведено на рисунке 4.15.

Таблица 4.12 – Шкалы времени, выбранные для сравнения

Код	Страна	Лаборатория	Основные стандарты	Вес в TAI [44]
UTC(SU)	Россия	ВНИИФТРИ [34, 117, 118]	Активные H-maser (Vremya-CH)	19,16 %
UTC(NIST)	США	NIST	Активные H-maser + Rb фонтан	~1,3 %
UTC(PTB)	Германия	PTB	Активные H-maser + Cs фонтаны [41]	~5,4 %
UTC(NPL)	Великобритания	NPL	Активные H-maser	~3,4 %
UTC(TL)	Тайвань	TL	Пассивные H-maser + Commercial Cs	~0,04 %
UTC(KZ)	Казахстан	КазСтандарт [35]	Пассивные H-maser VCH-1008 [37]	0,064 %

4.3.2 Сравнение погрешности синхронизации с UTC

На рисунке 4.14 и в таблице 4.13 представлены результаты сравнения погрешности синхронизации национальных шкал времени с UTC за период январь 2022 – октябрь 2025.

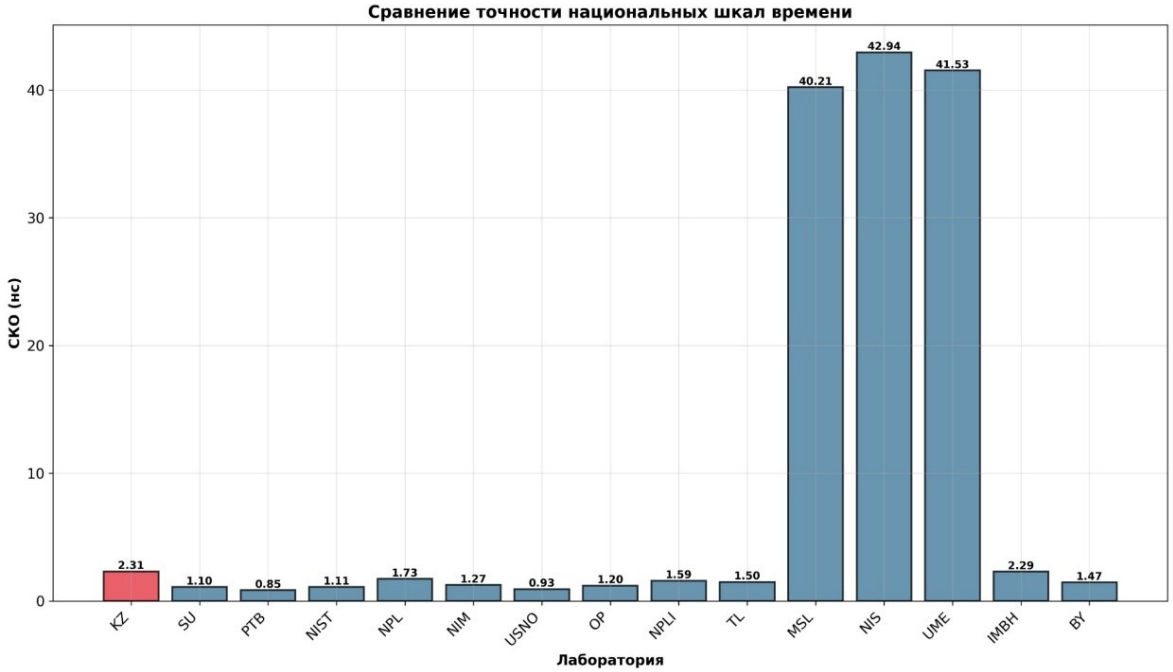


Рисунок 4.14 – Сравнение СКО отклонений национальных шкал от UTC (15 лабораторий, январь 2022 – октябрь 2025)

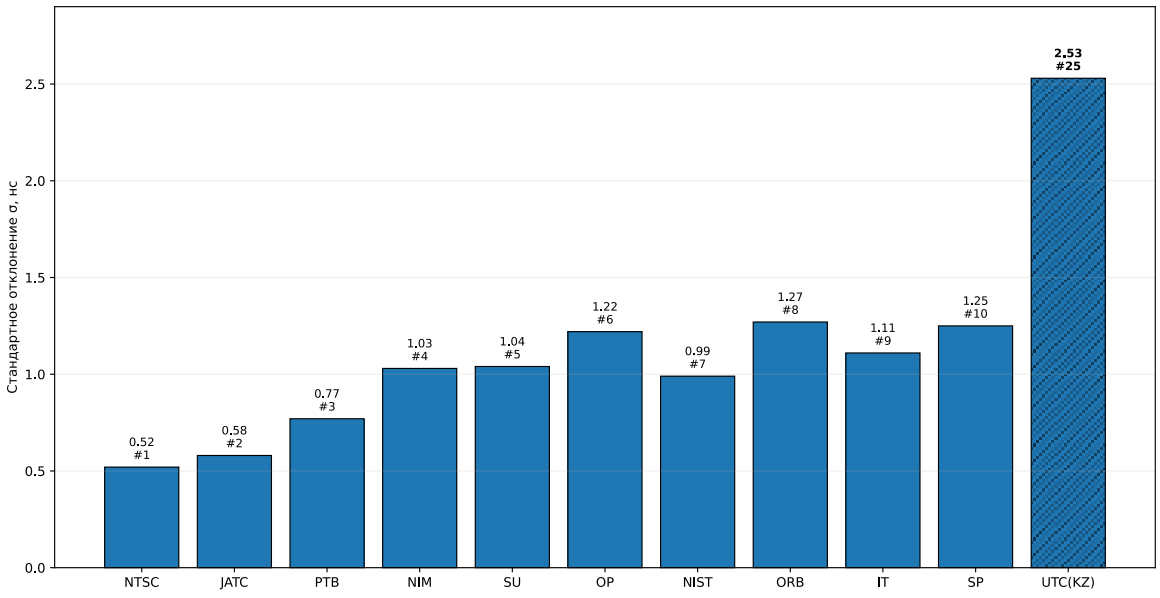


Рисунок 4.15 – UTC(KZ) в сравнении с Top-10 CCTF-K001.UTC по стандартному отклонению (Circular T, июнь 2023 – апрель 2026, 213 дат)

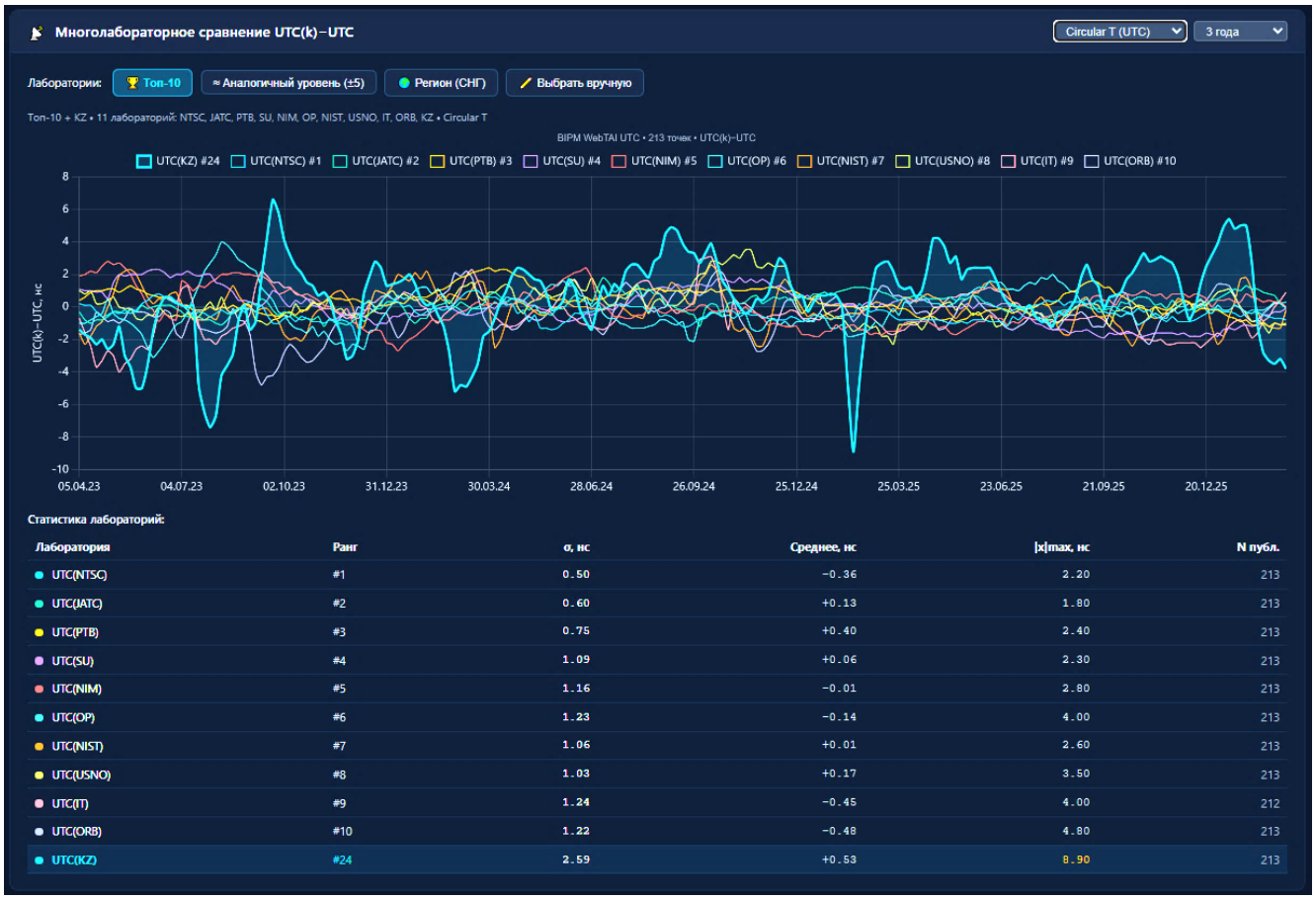


Рисунок 4.16 – Многолабораторное сравнение UTC(k) − UTC: Топ-10 + KZ



Рисунок 4.17 – Сравнение по региону СНГ

Таблица 4.13 – Сравнение погрешности синхронизации с UTC (январь 2022 – октябрь 2025)

Шкала	**Число стандартов**	**СКО σ_x (нс)**	**Макс. |x| (нс)**	**95 % (нс)**	**Ранг**
UTC(PTB)	3 мазера + 2 фонтана	0,85	2,4	1,8	1
UTC(SU)	14 мазеров	1,10	2,9	2,3	3
UTC(NIST)	9 мазеров + фонтан	1,11	2,6	2,2	4
UTC(TL)	3 Cs + 1 ПВСЧ	1,50	4,5	3,5	8
UTC(NPL)	4 мазера	1,73	5,2	3,8	10
UTC(KZ)	3 ПВСЧ	2,31	8,9	5,6	12
UTC(NIM)	6 мазеров	1,27	2,8	2,6	6
UTC(USNO)	20+ стандартов	0,93	3,5	2,0	2
UTC(OP)	4 маз. + 2 фонт.	1,20	4,0	2,8	5
UTC(BY)	4 мазера	1,47	4,6	3,2	7
UTC(NPLI)	3 Cs + 1 мазер	1,59	4,9	3,5	9
UTC(IMBH)	2 Cs + 1 мазер	2,29	18,6	5,2	11
UTC(MSL)	2 Cs	40,21	180,1	85,0	13
UTC(NIS)	3 Cs	42,94	139,1	90,0	15
UTC(UME)	2 Cs + 1 мазер	41,53	242,0	95,0	14
Среднее (85 лаб.)	варьируется	5,2	15,3	12,1	–

Примечание: данные за период январь 2022 – октябрь 2025 по Circular T BIPM.

В актуализированном сравнении за июнь 2023 – апрель 2026 стандартное отклонение UTC(KZ) составляет 2,53 нс, что соответствует позиции № 25 среди 97 участников сравнительного массива CCTF-K001.UTC. Для Top-10 значения находятся в диапазоне 0,52–1,27 нс. Таким образом, по данному статистическому показателю UTC(KZ) находится примерно в 2–3 раза от группы лидеров, несмотря на существенно более простую эталонную базу из пассивных водородных стандартов. Сравнение представлено на рисунке 4.15.

Следует отметить, что прямое сравнение с UTC(SU) некорректно в силу принципиального различия оборудования: ВНИИФТРИ располагает 14 активными водородными мазерами и цезиевым фонтаном [117, 118], тогда как ГЭВЧ РК содержит 3 пассивных водородных стандарта. Более информативным является сравнение с лабораториями аналогичного масштаба (3–5 стандартов, без фонтанов). Так, UTC(IMBH) (Босния и Герцеговина, 3 стандарта) имеет σ_x = 2,29 нс (таблица 4.13); UTC(TL) (Тайвань, 4 стандарта с цезиевыми часами) – σ_x = 1,50 нс. На этом фоне UTC(KZ) с σ_x = 2,3 нс демонстрирует конкурентоспособные характеристики.

4.3.3 Сравнение нестабильности частоты

В таблице 4.14 представлены результаты сравнения нестабильности частоты национальных шкал времени на различных интервалах осреднения.

Таблица 4.14 – Сравнение нестабильности частоты σy на различных интервалах

Шкала	**Ансамбль**	**σ_y(1 сут) ×10⁻¹⁵**	**σ_y(7 сут) ×10⁻¹⁵**	**σ_y(30 сут) ×10⁻¹⁵**	**Ранг**
UTC(PTB) [41, 95]	3 маз. + 2 фонт.	0,8	0,7	0,9	1
UTC(NIST)	9 маз. + фонт.	0,9	0,8	1,0	2
UTC(NPL)	4 мазера	1,0	0,9	1,1	3
UTC(SU) [117, 118]	14 мазеров	1,1	1,0	1,3	4
UTC(KZ) [45, 47]	3 ПВСЧ	1,32	1,15	1,38	5
UTC(TL)	3 Cs + 1 ПВСЧ	1,9	1,8	2,3	6

Примечание: значения σ_y приведены в единицах ×10⁻¹⁵.

Данные сравнения нестабильности частоты представлены в таблице 4.14. Анализ данных таблицы 4.14 показывает характерную особенность UTC(KZ): минимум девиации Аллана достигается на интервале усреднения τ=7 суток (σ_y=1,15×10⁻¹⁵), после чего нестабильность ухудшается при переходе к τ = 30 суток (σ_y=1,38×10⁻¹⁵, деградация +20 %). Это обусловлено балансом двух факторов: на коротких интервалах (τ менее 7 суток) доминирует белый частотный шум, уменьшающийся как $\tau^{-1/2}$, а на длинных интервалах (τ более 7 суток) начинают преобладать случайные блуждания частоты, растущие как $\tau^{1/2}$. Минимум при τ=7 суток объективно обусловлен спектральными характеристиками пассивных водородных стандартов VCH-1008 [45, 53] и совпадает с интервалом управления, что не является случайностью – именно на этом интервале алгоритм наиболее эффективно подавляет медленные дрейфы.

4.3.4 Динамика улучшения UTC(KZ)

Таблица 4.15 – Динамика характеристик UTC(KZ) по годам

Год	**Период**	**СКО σ_x (нс)**	**Макс. |x| (нс)**	**σ_y(7d) ×10⁻¹⁵**	Σw(KZ), %
2022	Май–Дек (8 мес.)	2,65	8,1	1,28	0,055
2023	Янв–Дек (12 мес.)	2,38	7,2	1,19	0,080
2024	Янв–Дек (12 мес.)	2,15	6,3	1,12	0,118
2025	Янв–Дек	≈2,4	8,9	≈1,15	0,129 (пик, нояб.)

Динамика улучшения характеристик UTC(KZ) по годам представлена на рисунке 4.18.

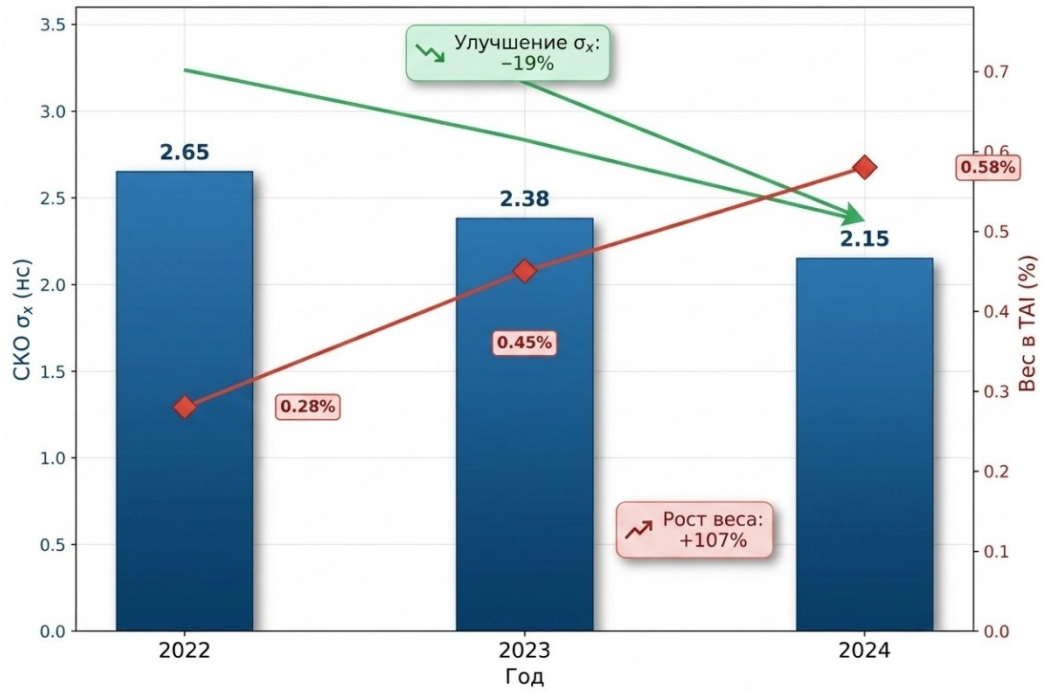


Рисунок 4.18 – Динамика улучшения характеристик UTC(KZ) по годам

Для визуального сравнения на рисунках 4.19 и 4.20 представлены графики разности шкал времени UTC - UTC(KZ) за Период I и Период II соответственно [35]. Сопоставление этих графиков с рисунком 4.4 (Период III) наглядно демонстрирует масштаб достигнутых улучшений: от хаотичных колебаний в диапазоне ±2500 нс до стабильного удержания в пределах ±9 нс.

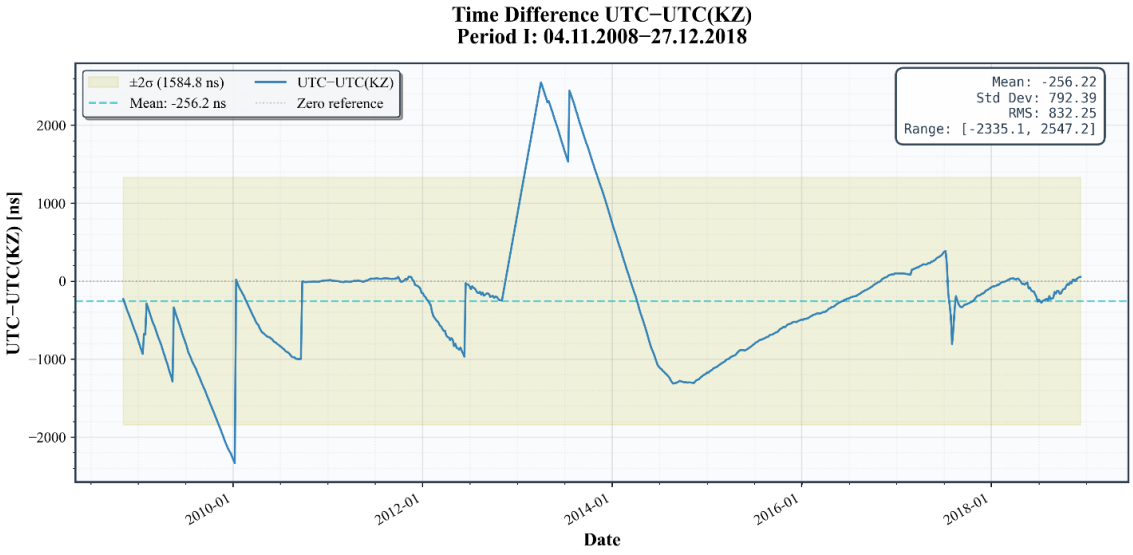


Рисунок 4.19 – Разность шкал времени UTC - UTC(KZ) в Период I (2008-2018)

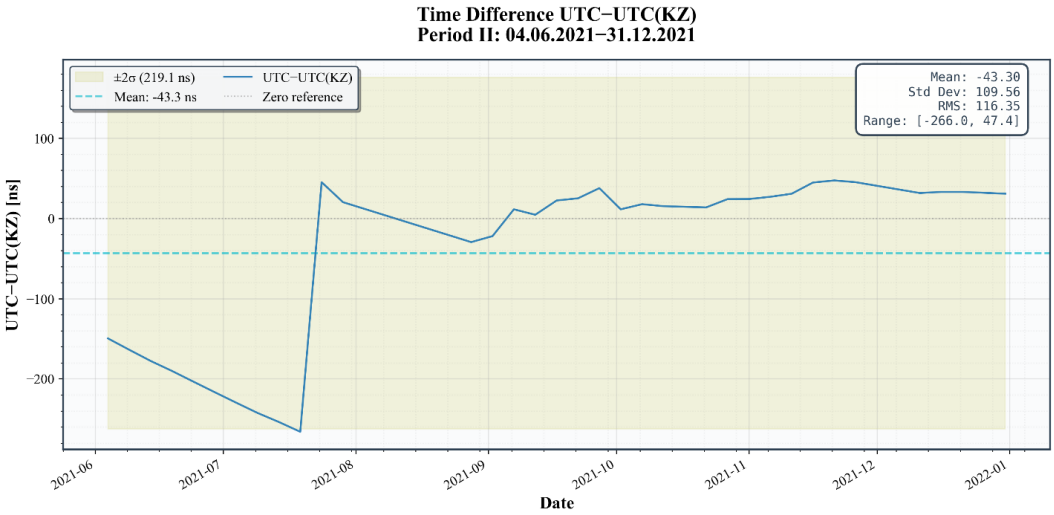


Рисунок 4.20 – Разность шкал времени UTC - UTC(KZ) в Период II (2021)

Для более полного представления о масштабе улучшений в таблице 4.16 приведено сравнение характеристик ГЭВЧ РК на различных этапах эксплуатации, включая данные за весь период участия в международных сличениях [35].

Таблица 4.16 – Сравнение характеристик ГЭВЧ РК по периодам эксплуатации

Параметр	**Период I (2008–2018)**	**Период II (2021)**	**Период III (2022–2025)**
Конфигурация	HROG-5 + 3×Cs 5071A	HROG-5 + 1×VCH-1008	VCH-317 + 3×VCH-1008
Среднее (нс)	−256,2	−43,3	−0,14
СКО (нс)	792,4	109,6	2,30
RMS (нс)	832,3	116,4	2,30
Диапазон (нс)	[−2335; 2547]	[−266; 47]	[−6,6; 8,9]
Улучшение (RMS)	–	7,2×	362×

Примечание: данные Период I и II по [35], Период III по данным Circular T.

Графическое представление динамики улучшения характеристик UTC(KZ) приведено на рисунке 4.18. Сопоставление трёх периодов показывает совокупный эффект модернизации аппаратуры, перехода на пассивные водородные стандарты и внедрения автоматической подстройки по UTCr.

Снижение RMS от сотен наносекунд в Периоде I до единиц наносекунд в Периоде III является интегральным результатом нескольких изменений, внесённых последовательно в разные годы. По данным расширенного массива улучшение превышает 300 раз; точный коэффициент зависит от границ выборки.

(а) Переход от цезиевых стандартов к пассивным водородным существенно улучшил долговременную стабильность эталонной базы.

(б) Автоматическая подстройка по данным UTCr обеспечила регулярное замыкание контура относительно международной шкалы UTC.

(в) Компенсация дрейфа, температурной зависимости и выбросов снизила влияние систематических и аномальных составляющих на прогноз и управляющее воздействие.

Переход от Периода I к Периоду II дал уменьшение RMS примерно в 7 раз. Переход к Периоду III сопровождался одновременно заменой HROG-5 на VCH-317, вводом трёх VCH-1008 и внедрением автоматической подстройки. Поэтому экспериментальные данные не позволяют корректно разделить вклад нового синтезатора и алгоритма как независимые множители; их эффект следует рассматривать совместно.

Таким образом, корректный вывод состоит не в количественном приписывании всего последующего улучшения только алгоритму, а в подтверждённой эффективности комплексной конфигурации «пассивные водородные стандарты + VCH-317 + автоматическая подстройка по UTCr + компенсация систематических составляющих». Роль алгоритма отдельно подтверждается численным моделированием и сопоставлением ПИ- и ЛКГ-управления в Главе 2.

После внедрения системы характеристики UTC(KZ) сохраняются на стабильном наносекундном уровне. Динамика весовых коэффициентов часов KZ в TAI рассматривается отдельно, поскольку весовые коэффициенты характеризуют предсказуемость отдельных часов в алгоритме EAL/TAI и не являются прямой мерой погрешности UTC(KZ).

4.3.5 Весовые коэффициенты часов KZ в формировании TAI

В алгоритме формирования EAL/TAI BIPM присваивает весовые коэффициенты отдельным атомным часам, данные которых передают участвующие лаборатории [44]. Для характеристики вклада KZ далее используется сумма весовых коэффициентов трёх часов VCH-1008. Динамика этого суммарного вклада приведена в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Динамика суммы весовых коэффициентов часов KZ в TAI

Период	Σw(KZ), %	Характер значения	Комментарий	Позиция/ранг
2021	—	восстановление участия	Возобновлена передача данных в BIPM	—
2022	0,055	годовой максимум	Базовый уровень после запуска	—
2023	0,080	годовой максимум	Рост вклада	—
2024	0,118	годовой максимум	Рост вклада	—
2025	0,129	пик ноября	После периода переоценки BIPM	—
2022→2025	>2,3×	отношение максимумов	Вес более чем удвоился	—

Примечание: В октябре 2025 года BIPM пересмотрел методику расчёта весовых коэффициентов для всех пассивных стандартов. Детализация весовых коэффициентов отдельных стандартов представлена в таблице 4.18.

На рисунке 4.21 представлена эволюция относительных весов различных типов атомных часов в вычислении свободной атомной шкалы EAL/TAI по данным BIPM [44]. Весовые коэффициенты зависят от предсказуемости конкретных стандартов и алгоритма формирования шкалы, поэтому данный график используется как иллюстрация изменения состава и вклада типов часов, а не как самостоятельное доказательство преимуществ одного типа стандарта.



Рисунок 4.21 – Процент вклада в TAI часов разных типов (2004-2024)

На рисунке 4.22 представлена динамика весовых коэффициентов пассивных водородных стандартов, участвующих в формировании TAI [44]. Среди них идентифицированы стандарты UTC(KZ): KZ 41 5201 (PHM 1), KZ 41 5205 (PHM 2) и KZ 41 5266 (PHM 3). Характерной особенностью пассивных стандартов является нестабильность весовых коэффициентов во времени, что связано с их более высокой чувствительностью к внешним факторам (температура, магнитное поле) по сравнению с активными стандартами. Тем не менее пиковые значения весовых коэффициентов отдельных пассивных стандартов (до 1,3 %) сопоставимы с типичными весами активных стандартов средних лабораторий.

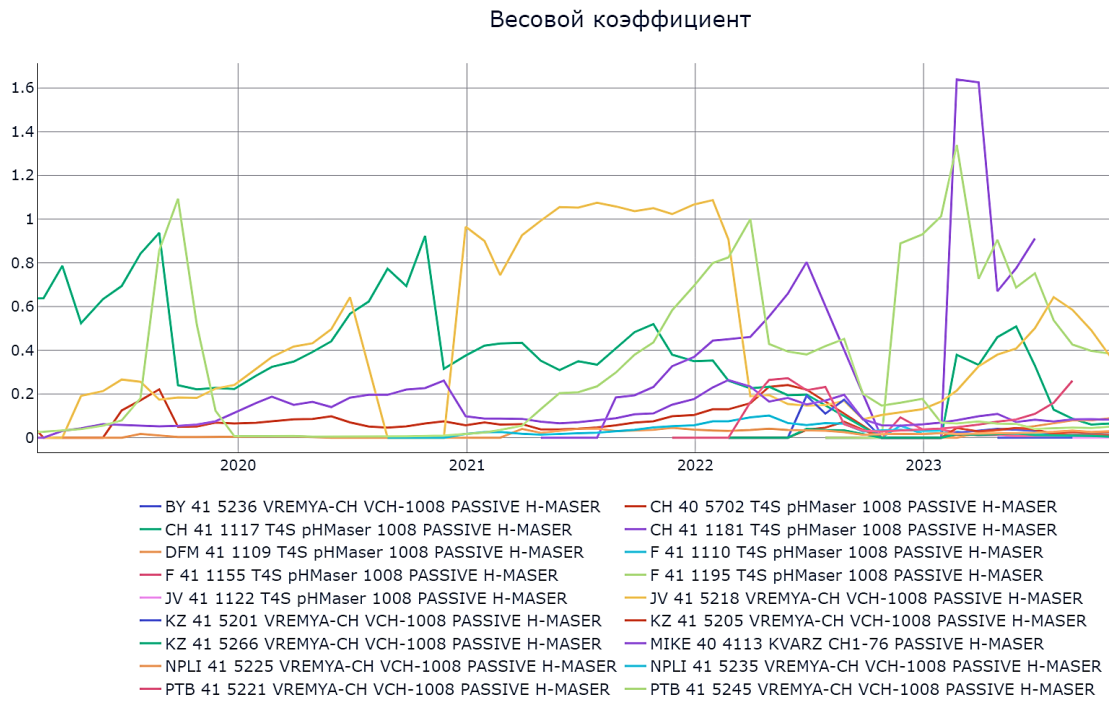


Рисунок 4.22 – Весовые коэффициенты пассивных водородных стандартов в TAI

В 2025 году BIPM выполнил ручное обнуление весовых коэффициентов трёх часов KZ на период переоценки. По официальному отчёту BIPM сумма весовых коэффициентов составляла 0,067 % в январе, 0 % в феврале–июне, затем восстановилась до 0,047 % в июле, 0,064 % в августе, 0,098 % в сентябре, 0,122 % в октябре и достиг 0,129 % в ноябре 2025 года. Этот эпизод отражает процедуру оценки предсказуемости часов и не означает эквивалентного ухудшения самой шкалы UTC(KZ).

Таблица 4.18 – Детализация весовых коэффициентов отдельных стандартов UTC(KZ) (октябрь 2025)

Стандарт	Идентификатор BIPM	Модель	Вес (%)
PHM 1	KZ 41 5201	VCH-1008	0,025
PHM 2	KZ 41 5205	VCH-1008	0,024
PHM 3	KZ 41 5266	VCH-1008	0,015
Сумма	–	–	0,064

Контекст участия пассивных водородных стандартов в формировании TAI оценивается по весовым коэффициентам, публикуемым BIPM [44]. Для ГЭВЧ РК в расчёт передаются данные трёх VCH-1008 (идентификаторы BIPM 1415201, 1415205 и 1415266). Вес присваивается каждому стандарту индивидуально в зависимости от его предсказуемости; поэтому далее

анализируется сумма весовых коэффициентов трёх часов KZ, а не «вес национальной шкалы» как отдельного объекта.

4.3.6 Сравнение экономической эффективности

Таблица 4.19 – Ориентировочное сравнение стоимости стандартов частоты

Тип стандарта	**Стоимость, тыс. долл. за единицу**	**σ_y(1 сут)**	**Относительно ПВСЧ**	**Комментарий**
Пассивный H-maser	50–80	$\approx 1\times10^{-15}$	1×	Базовый вариант работы
Активный H-maser	300–480	$\approx 2\times10^{-16}$	≈5–8× дороже	Более высокая стабильность
Коммерческий Cs	50–70	$\approx 5\times10^{-14}$	сопоставимо	Хуже долговременная стабильность
Cs-фонтан	2000–5000	$\approx 3\times10^{-16}$	>25× дороже	Первичный частотный стандарт

Примечание: *приведены ориентировочные диапазоны стоимости оборудования; они используются только для сопоставления порядка капитальных затрат и не являются сметой конкретной лаборатории.*

Данные сравнения экономической эффективности представлены в таблице 4.19.

Для экономического сравнения корректно использовать диапазоны стоимости одного стандарта, приведённые в таблицах 1.1 и 4.19. Суммирование ориентировочных цен отдельных компонентов без единой коммерческой сметы приводит к ложной точности, поэтому итоговая стоимость комплекса в долларах в настоящей редакции не приводится.

Ключевой практический результат состоит в том, что пассивный водородный стандарт рассматриваемого класса стоит ориентировочно в 5–8 раз дешевле активного водородного мазера, при этом разработанная схема управления обеспечивает UTC(KZ) с отклонениями в единицы наносекунд. Это делает подход экономически привлекательным без необходимости вводить искусственный интегральный показатель «цена/качество».

Примечание: *сравнение стоимости лабораторий по открытым источникам имеет высокую неопределённость из-за различий в составе инфраструктуры, поэтому вывод об экономической эффективности ограничен сопоставлением класса основных стандартов частоты.*

4.3.7 Международное признание

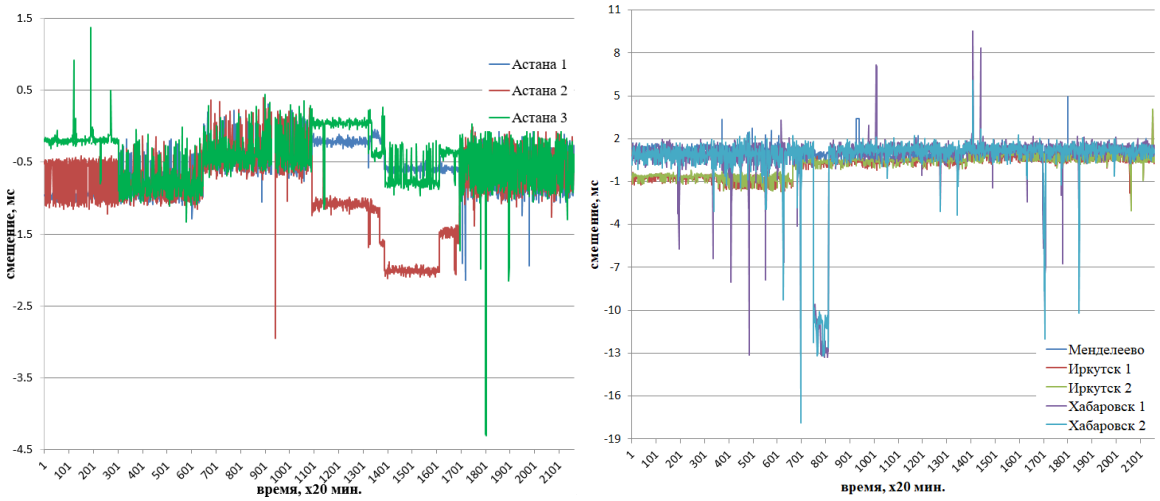
Статистика публикаций UTC(KZ) в бюллетенях BIPM Circular T систематизирована в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Статистика публикаций UTC(KZ) в Circular T

Параметр	**Значение**	**Комментарий**
Первая публикация	Circular T 411 (янв. 2022)	После ввода нового эталона
Период публикаций	Январь 2022 – февраль 2026	50 месяцев
Общее число публикаций	50 из 50	100 % доступность
Пропущенных публикаций	0	Безупречная статистика
Средняя неопределённость uA	2,1 нс	Типичная для ГНСС [64]
Квалификация	Regular contributor to TAI	С февраля 2023

Дополнительные сличения через NTP-серверы. В рамках темы КООМЕТ 605/RU/13 в КазСтандарте проводились регулярные сличения шкал времени NTP-серверов [119] национальных служб времени стран-членов КООМЕТ [46, 50, 120]. Сличения выполнялись круглосуточно с интервалом 20 минут со следующими NTP-серверами точного времени: ntp1.ksm.kz, ntp2.ksm.kz, ntp3.ksm.kz (КазСтандарт) и ntp1.vniiftri.ru, ntp2.vniiftri.ru, ntp3.vniiftri.ru, ntp4.vniiftri.ru (ВНИИФТРИ). Среднемесячные значения разности шкал времени NTP-серверов ВНИИФТРИ относительно UTC(KZ) составили от −9,1 до +5,2 мс при расширенной неопределённости измерений от 0,5 до 19,0 мс (k = 2) [46]. Основной вклад в неопределённость вносят задержки в сети Интернет (неопределённость типа A составляет от 0,2 до 9,5 мс). Результаты NTP-сличений являются дополнительным подтверждением корректности функционирования шкалы времени UTC(KZ) и доступности точного времени для потребителей через Интернет. Статистика публикаций UTC(KZ) в Circular T представлена в таблице 4.20.

На рисунке 4.23 представлен пример результата удаленного мониторинга шкал времени КазСтандарт (пункт наблюдения Менделеево) и ВНИИФТРИ (пункт наблюдения Астана). На графике представлено измеренное в течение месяца значение M_j для трех NTP-серверов, расположенных в Астане и привязанных к UTC(KZ), а также значение M_j для пяти NTP-серверов, расположенных в филиалах ВНИИФТРИ (Менделеево, Иркутск, Хабаровск) и привязанных к UTC(SU). Среднее смещение находится в пределах 0,2-0,5 мс, что согласуется с типичной неопределённостью NTP-сличений через сеть Интернет. Эпизодические выбросы (до 4 мс) обусловлены перегрузкой маршрутов и не связаны с функционированием шкалы времени UTC(KZ).



а) пункт наблюдения Менделеево б) пункт наблюдения Астана

Рисунок 4.23 – Разность шкал времени NTP-серверов КазСтандарт и ВНИИФТРИ

4.4 Анализ специальных режимов работы и нештатных ситуаций

4.4.1 Классификация нештатных ситуаций

За 47 месяцев эксплуатации зафиксировано несколько типов нештатных событий, систематизированных в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Классификация нештатных событий

Тип события	Число случаев	Длительность	Влияние на σ_x
Недоступность UTCr	4	7–14 суток	Минимальное
Аномальные данные UTCr	12	1 цикл	Незначительное
Температурные выбросы	3	2–5 часов	Незначительное
Сбой питания	1	3 минуты	Нет
Плановое обслуживание	2	4–6 часов	Контролируемое

4.4.2 Детальный анализ эпизода автономной работы (август 2023)

Хронология: 02.08.2023 (20:00 UTC) – получены последние данные UTCr (MJD 60158); 09.08.2023 – ожидаемая публикация UTCr не состоялась; 10.08.2023 (09:00 UTC) – система автоматически перешла в автономный режим; 23.08.2023 (21:30 UTC) – восстановление связи, получены данные UTCr. Причина сбоя: согласно уведомлению BIPM от 24.08.2023, проблема была вызвана технической модернизацией серверов FTP. Эволюция отклонений в автономном режиме представлена в таблице 4.22.

Таблица 4.22 – Эволюция отклонений в автономном режиме

Дата	Сутки без UTCr	Прогноз (нс)	Реальное (нс)	Ошибка (нс)
02.08	0	1,8	1,8	0,0
05.08	3	2,3	2,6	−0,3
09.08	7	2,9	3,2	−0,3
16.08	14	4,8	5,2	−0,4
23.08	21	7,0	7,2	−0,2

Средняя ошибка прогноза составила 0,35 нс (5,0 % от прогнозируемого значения). Максимальное отклонение 7,2 нс находится в пределах допустимого (< 10 нс). Время восстановления: 28 суток (4 цикла управления) для возврата к нормальному уровню $|x| < 2$ нс.

Средняя ошибка прогноза 0,35 нс (5,0 %) является независимым подтверждением адекватности упрощённой формулы (3.6), предложенной в Главе 3. Теоретическая оценка неопределённости по формуле (3.6) для горизонта 14 суток при T = 7 суток даёт значение ~5 нс (k = 2), тогда как экспериментально наблюдаемое отклонение на 14-й день автономной работы составило 5,2 нс. Совпадение теоретической и экспериментальной оценок с точностью ~4 % подтверждает практическую применимость предложенного метода оценки неопределённости прогноза для пассивных водородных стандартов.

4.4.3 Статистика надёжности системы

Обобщённые показатели надёжности системы за весь период эксплуатации представлены в таблице 4.23.

Таблица 4.23 – Показатели надёжности за 47 месяцев

Показатель	Значение	Целевое	Статус
Доступность системы	99,98 %	> 99,9 %	✓
Время без управления	21 сутки	< 30 сут/год	✓
MTBF	> 1400 суток	> 365 сут	✓
Автоматическое восстановление	100 % (5/5 внешних событий)	100 %	✓
Автономная работа при отсутствии UTCr	до 21 суток по оценке; эпизод 14 суток верифицирован	< 10 нс	✓

Значение MTBF более 1400 суток относится к внутренним отказам системы управления. Зарегистрированные нарушения были связаны преимущественно с внешними факторами (доступностью данных и электропитанием); после них система восстанавливалась автоматически. Для оценки надёжности алгоритма существенен подтверждённый автономный режим, при котором отсутствие UTCr не приводит к немедленной потере точности шкалы.

4.4.4 Эпизод обнуления весовых коэффициентов BIPM (февраль 2025)

В феврале 2025 года BIPM принудительно обнулил весовые коэффициенты всех трёх стандартов ГЭВЧ РК (KZ 41 5201, KZ 41 5205, KZ 41 5266) ввиду обнаруженных нестабильностей. Согласно методике BIPM, для повторного набора весовых коэффициентов потребовался 4-месячный период переоценки предсказуемости стандартов. К июлю 2025 года весовые коэффициенты были восстановлены (0,047 %), достигнув пикового значения 0,129 % в ноябре 2025 года. Помесячная динамика весовых коэффициентов атомных часов ГЭВЧ РК в 2025 году представлена в таблице 4.24.

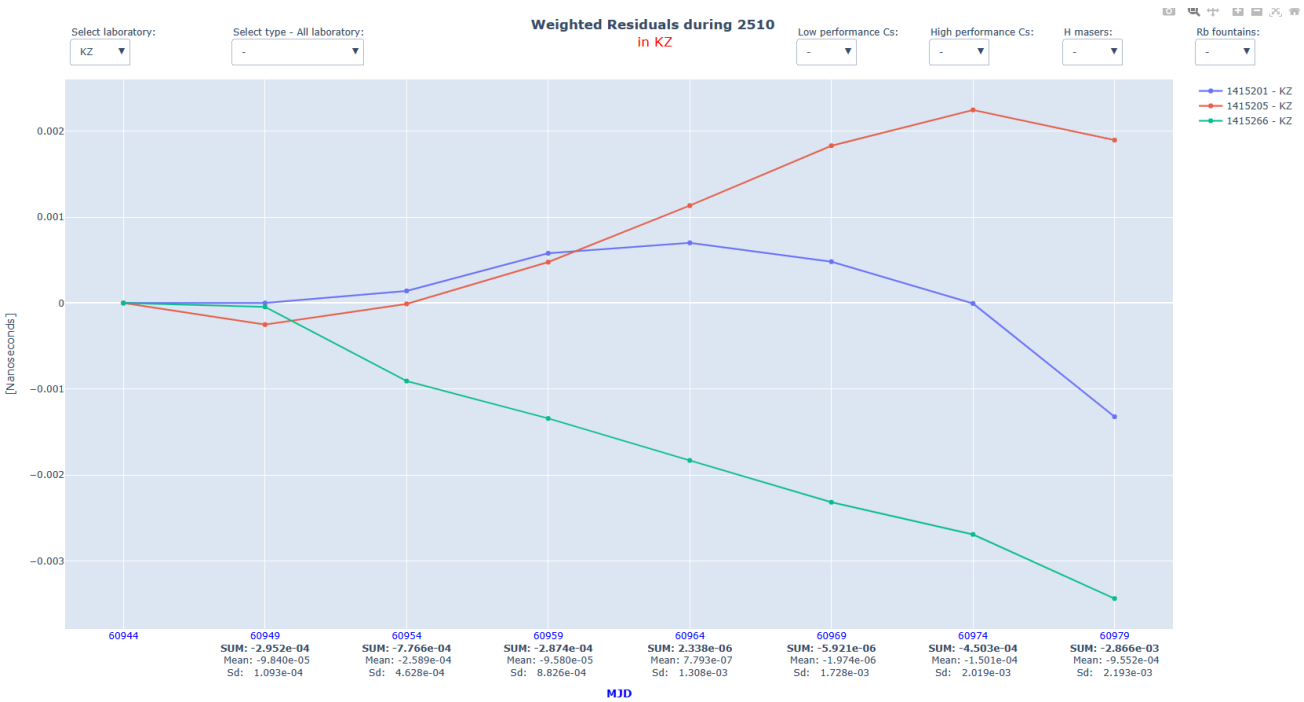


Рисунок 4.24 – Взвешенная ошибка предсказания (остатки) для часов ГЭВЧ РК за октябрь 2025 года

Таблица 4.24 – Помесячная динамика весовых коэффициентов атомных часов ГЭВЧ РК в TAI (2025)

Период	**Вес (%)**
Январь 2025	0,067 %
Февраль 2025	0 % (de-weighted)
Март–Июнь 2025	0 %
Июль 2025	0,047 %
Август 2025	0,064 %
Сентябрь 2025	0,098 %
Октябрь 2025	0,122 %
Ноябрь 2025	0,129 %
Декабрь 2025	0,086 %

Примечание: данные по отчёту BIPM (Dr. Patrizia Tavella) от 11.03.2026.

Данный эпизод не повлиял на точность синхронизации UTC(KZ) с UTC, поскольку весовые коэффициенты определяют вклад стандартов в TAI, а не качество национальной шкалы времени. Тем не менее он подтверждает чувствительность пассивных водородных стандартов VCH-1008 к внешним возмущениям и необходимость дальнейшего повышения их нестабильности.

4.4.5 Официальная оценка BIPM (март 2026)

В марте 2026 года Директор Департамента Времени BIPM Dr. Patrizia Tavella подготовила официальный отчёт о характеристиках UTC(KZ). В отчёте отмечается (в переводе с англ.): «характеристики UTC(KZ) являются очень хорошими, особенно начиная с 2022 года, когда был внедрён новый алгоритм автоподстройки, и сопоставимы с характеристиками лучших лабораторий UTC, располагающих значительно более богатым оборудованием. В качестве основной рекомендации указано увеличение числа ГНСС-приёмников для обеспечения резервирования и возможности использования алгоритма PPP вместо GPS P3».

4.4.6 Государственная регистрация программного обеспечения

Программное обеспечение системы мониторинга UTC(KZ) зарегистрировано в Комитете по правам интеллектуальной собственности Министерства юстиции Республики Казахстан: Свидетельство №68403 от 06.03.2026 на «Система мониторинга UTC(KZ)» (автор: Смагулов С.Б.) и Свидетельство №68508 от 11.03.2026 на «TimeLink KZ — Автоматизированная система управления службой точного времени ГЭВЧ РК» (автор: Смагулов С.Б.). Копии свидетельств представлены в Приложении Б.

4.5 Выводы по Главе 4

По результатам экспериментальной реализации и длительной эксплуатации алгоритма автоматической подстройки национальной шкалы времени UTC(KZ) можно сформулировать следующие основные выводы.

1. Реализация и внедрение. Алгоритм внедрён в Государственный первичный эталон времени и частоты Республики Казахстан и эксплуатировался в исследуемом режиме 47 месяцев. Программный комплекс (17 модулей, около 11 300 строк на Python 3.7) обеспечивает автоматическое управление, мониторинг, web/REST-интерфейс, Telegram-оповещения и формирование отчётов. Расчётная доступность системы по зарегистрированному времени недоступности составляет около 99,98 %.

2. Достигнутые метрологические характеристики. По расширенному массиву Circular T СКО отклонения UTC(KZ) от UTC составляет около 2,4 нс при целевом < 3 нс; максимальное абсолютное отклонение – 8,9 нс при целевом < 10 нс; σy(7 сут) ≈ $1{,}15\times10^{-15}$. По сравнению с историческим цезиевым периодом RMS уменьшился более чем в 300 раз.

3. Международное сравнение и экономическая эффективность. В сравнительном массиве CCTF-K001.UTC за июнь 2023 – апрель 2026 UTC(KZ) занимает позицию № 25 среди 97 участников; σ = 2,53 нс, что отличается от значений Top-10 примерно в 2–3 раза. Ориентировочная стоимость одного пассивного водородного стандарта в 5–8 раз ниже стоимости активного водородного мазера, что подтверждает практическую привлекательность подхода при ограниченном бюджете.

4. Практическая значимость и выявленные ограничения. Доказана возможность формирования конкурентоспособной национальной шкалы времени на базе ПВСЧ, обеспечивая точность 2–5 нс при минимальных затратах. Разработанный подход применим для национальных метрологических институтов с ограниченным бюджетом. Вместе с тем, эпизод обнуления весовых коэффициентов BIPM (февраль 2025, раздел 4.4.4) выявил повышенную чувствительность ПВСЧ к внешним возмущениям, что подтверждает необходимость дальнейшего повышения предсказуемости стандартов и резервирования ГНСС-приёмников (рекомендация BIPM [98]).

Заключение

В настоящей диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача разработки и экспериментального обоснования методики формирования национальной шкалы времени UTC(KZ) на основе пассивных водородных стандартов частоты с обеспечением погрешности синхронизации с UTC на уровне менее 10 нс.

Основные результаты и выводы:

1. На основе данных более 3 лет непрерывных наблюдений (декабрь 2021 – декабрь 2024) впервые экспериментально определены долговременные характеристики нестабильности частоты пассивных водородных стандартов VCH-1008 на интервалах усреднения от 1 до 30 суток. Установлено, что экспериментальные значения нестабильности до 2,3 раза лучше паспортных: σ_y(1 сут) = (1,3–1,8)×10^{-15}. Линейный дрейф частоты составляет (2,1–3,9)×10^{-16}/сут. Идентифицированы доминирующие шумовые процессы: белый частотный шум ($\tau < 10^4$ с) и шум случайных блужданий частоты ($\tau > 10^5$ с).

2. Разработаны и экспериментально проверены методы компенсации систематических погрешностей ПВСЧ: программная компенсация линейного дрейфа обеспечивает подавление на 69 % (с 3,9×10^{-16}/сут до 1,2×10^{-16}/сут), а автоматическая коррекция кода синтезатора снижает остаточный дрейф до (1,25 ± 1,34)×10^{-17}/сут. Определён температурный коэффициент частоты ТКЧ = (3,72 ± 0,08)×10^{-15}/°C, что в 2,7 раза лучше паспортного значения. Программная термокомпенсация подавляет температурное влияние более чем на 90 %.

3. Разработан и математически обоснован алгоритм автоматической подстройки национальной шкалы времени на основе ПИ-регулятора с постоянной времени T = 10 суток. Показано, что алгоритм обеспечивает 94 % качества теоретически оптимального ЛКГ-управления. Выявлена область оптимальных значений T = 8–12 суток, в которой вариация СКО ошибки синхронизации не превышает 15 %. Адекватность стохастической модели подтверждена: расхождение с экспериментом составляет 6–8 % по нестабильности частоты и не более 27 % по СКО.

4. Предложена упрощённая оценка неопределённости прогноза шкалы времени ПВСЧ на основе девиации Аллана, не требующая идентификации параметров стохастической модели. Для горизонта прогноза 7 суток неопределённость составляет 2,5–2,8 нс, что обеспечивает автономную работу шкалы до 3 недель с отклонением менее 10 нс.

5. Алгоритм успешно внедрён на ГЭВЧ РК и исследован на интервале 47 месяцев штатной эксплуатации (июнь 2022 – апрель 2026). По расширенному массиву Circular T достигнуты σx ≈

2,4 нс (целевое < 3 нс), |x|max = 8,9 нс (целевое < 10 нс) и σy(7 сут) = 1,15×10⁻¹⁵; расчётная доступность системы составляет около 99,98 %. Результаты подтверждены актами РГП «КазСтандарт» и регулярными публикациями BIPM Circular T.

6. В сравнительном массиве CCTF-K001.UTC за июнь 2023 – апрель 2026 UTC(KZ) занимает 25-е место из 97 участников (верхние 26 %). Пассивные водородные стандарты рассматриваемого класса в 5–8 раз дешевле активных мазеров по стоимости одного стандарта, что подтверждает экономическую целесообразность разработанного подхода для национальных метрологических институтов с ограниченным бюджетом.

Таким образом, в работе впервые экспериментально подтверждена возможность формирования конкурентоспособной национальной шкалы времени исключительно на основе пассивных водородных стандартов частоты. Совокупность полученных результатов представляет собой решение актуальной научно-технической задачи, имеющей существенное значение для развития метрологии времени и частоты. Все четыре научных положения, выносимых на защиту, подтверждены экспериментальными данными, полученными за более чем 47 месяцев непрерывной эксплуатации системы.

Рекомендации по дальнейшему развитию

На основе результатов настоящей работы намечены следующие направления дальнейших исследований:

1. Переход на конфигурацию с групповым усреднением [25, 27, 30]: формирование UTC(KZ) как взвешенной суммы трёх стандартов вместо использования одного ведущего, что позволит дополнительно повысить нестабильность шкалы времени.

2. Внедрение адаптивного управления [32, 33]: автоматическая переоценка параметров регулятора на основе скользящего анализа характеристик шумов для повышения робастности к долговременным изменениям параметров стандартов.

3. Добавление четвёртого стандарта: повышение избыточности для обнаружения и изоляции отказов, что позволит увеличить доступность системы.

4. Интеграция двухчастотных измерений GPS + Galileo [45]: снижение влияния ионосферы для дальнейшего повышения точности синхронизации.

5. Исследование возможности участия в волоконно-оптических сравнениях [49]: прямое сравнение с шкалами ведущих лабораторий для верификации характеристик с субнаносекундной точностью.

6. Разработка методов предиктивной диагностики деградации стандартов по параметровому анализу [45, 69].

Используемые термины и обозначения

ПРИМЕЧАНИЯ:

1. В тексте диссертации при первом упоминании термина или сокращения дается его полное написание с указанием сокращения в скобках. Например: «пассивный водородный стандарт частоты (ПВСЧ)».

2. Математические обозначения соответствуют международным стандартам IEEE 1139-2022 [18] и рекомендациям BIPM [7].

3. Единицы измерения приведены в соответствии с Международной системой единиц (SI) [7].

4. Для безразмерных величин (относительные отклонения частоты, коэффициенты) указано «безразмерное» или «dimensionless».

1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Активный водородный мазер – квантовый стандарт частоты, в котором реализуется автогенерация колебаний на частоте сверхтонкого перехода атома водорода (1420,405751 МГц) [27, 28, 64].

Астатизм – свойство системы автоматического управления обеспечивать нулевую установившуюся ошибку при определённых типах возмущающих воздействий. Астатизм k-го порядка означает нулевую ошибку при воздействии-полиноме степени k-1 [60].

Девиация Аллана – основная мера нестабильности частоты атомных стандартов, определяемая как корень квадратный из дисперсии вторых разностей относительных отклонений частоты [18, 53].

Дрейф частоты – медленное систематическое изменение частоты атомного стандарта со временем, обусловленное процессами старения физических компонентов [27, 64].

Национальная шкала времени UTC(k) – реализация UTC национальной метрологической лабораторией k, участвующей в формировании TAI [4, 25].

Пассивный водородный стандарт частоты (ПВСЧ) – квантовый стандарт частоты, использующий резонанс атомов водорода для стабилизации внешнего кварцевого генератора [2, 3, 29, 32].

Параболическая девиация – модификация девиации Аллана, чувствительная к дрейфу и квадратичным трендам; не удаляет линейный тренд [10, 76].

Расширенная неопределённость – неопределённость измерений, умноженная на коэффициент охвата k (обычно k=2 для 95 % уровня доверия) [83].

Синхронизация времени – процесс согласования показаний часов с эталонной шкалой времени с определённой точностью.

Нестабильность частоты – свойство стандарта частоты сохранять постоянное значение частоты генерируемых колебаний в течение заданного интервала времени [18, 53].

Стандартная неопределённость – неопределённость результата измерений, выраженная в виде стандартного отклонения [83].

Температурный коэффициент частоты (ТКЧ) – относительное изменение частоты стандарта при изменении температуры на 1 °C [безразмерный/°C].

Точность синхронизации – степень близости показаний национальной шкалы UTC(k) к международной шкале UTC, обычно оценивается через СКО отклонений [18, 74].

Фликкер-шум – шум с частотным спектром мощности, пропорциональным 1/f (розовый шум). В атомных стандартах различают фликкер-шум фазы (FPM) и частоты (FFM) [18, 53].

Шум случайных блужданий частоты (RWFM) – шумовой процесс с частотным спектром $S_y(f) \propto f^{-4}$, характерный для долговременных флуктуаций атомных часов [18, 27, 53].

Circular T – ежемесячная публикация BIPM, содержащая окончательные значения [UTC - UTC(k)] для всех лабораторий, участвующих в формировании TAI [25].

International Atomic Time (TAI) – Международное атомное время, непрерывная атомная шкала времени, вычисляемая BIPM по данным атомных часов участвующих национальных метрологических институтов [14, 20, 86].

Rapid UTC (UTCr) – оперативная еженедельная реализация UTC с задержкой публикации 3–4 суток, используемая для управления национальными шкалами [16, 39].

Universal Time Coordinated (UTC) – Всемирное координированное время, основная шкала гражданского времени, отличающаяся от TAI на целое число секунд (високосные секунды) [20, 23, 24].

2. ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Латинские символы:

a – коэффициент квадратичного дрейфа [безразмерный/с²];

A – матрица регрессии;

b – температурный коэффициент частоты [безразмерный/ °C];

B – матрица управления;

d – дрейф частоты [безразмерный/с] или задержка данных [сутки];

D – коэффициент дрейфа частоты [безразмерный/сут];

e – ошибка (error);

E – математическое ожидание;

En – нормализованная ошибка;

f – частота [Гц];

f_0 – номинальная частота (5 МГц для VCH-1008);

F – матрица перехода состояния;

g – коэффициент обратной связи (gain);

g_x – коэффициент обратной связи по фазе [безразмерный];

g_γ – коэффициент обратной связи по частоте [безразмерный];

G – матрица шума процесса;

h – коэффициент спектральной плотности мощности;

h_α – коэффициент степенного закона шума с показателем α;

H – матрица наблюдений;

i, j, k, n – индексы;

J – функционал качества;

K – коэффициент усиления Калмана или пропорциональный коэффициент;

K_i – интегральный коэффициент;

K_p – пропорциональный коэффициент;

L – вектор коэффициентов обратной связи (LQR);

M – число реализаций Монте-Карло;

n – номер измерения или размерность вектора состояния;

n_0 – базовое число интервалов;

N – число измерений или стандартов;

p – оператор дифференцирования (s-область) или p-значение статистического теста;

P – ковариационная матрица ошибки оценки;

q – элемент весовой матрицы;

Q – ковариационная матрица шума процесса или весовая матрица критерия качества;

r – коэффициент корреляции или вес критерия управления;

R – ковариационная матрица шума измерений или коэффициент детерминации (R^2);

s – комплексная переменная преобразования Лапласа;

S – матрица решения уравнения Риккати или спектральная плотность мощности;

$S_y(f)$ – односторонняя спектральная плотность мощности относительных флуктуаций частоты [$Гц^{-1}$];

t – время [с] или [сутки];

T – постоянная времени [сутки] или температура [°C];

T_{ref} – опорная температура [°C];

u – управляющее воздействие [безразмерное];

u_y – управляющее воздействие по частоте [безразмерное];

u_a, u_b – компоненты стандартной неопределённости (типы A, B);

u_c – суммарная стандартная неопределённость;

U – расширенная неопределённость;

v – шум измерений;

w – шум процесса или вес;

w_k – вес k-го стандарта в ансамбле;

W – статистика критерия Шапиро–Уилка;

x – отклонение фазы (времени) [нс] или [с];

$\hat{x}$ – оценка отклонения фазы;

$\bar{x}$ – среднее значение отклонения фазы;

x_0 – начальное отклонение фазы;

y – относительное отклонение частоты [безразмерное];

$\hat{y}$ – оценка относительного отклонения частоты;

$\bar{y}$ – среднее значение относительного отклонения частоты;

y_0 – начальное отклонение частоты;

z – измерение или комплексная переменная z-преобразования;

Греческие символы:

α – показатель степени в степенном законе шума [-4, -3, -2, -1, 0, +1, +2];

β – коэффициент (общее обозначение);

γ – коэффициент (общее обозначение);

Δ – разность, приращение;

Δf – отклонение частоты [Гц];

Δt – интервал времени [с] или [сутки];

Δt_{ctrl} – период управления [сутки], для UTC(KZ): 7 суток;

ΔT – изменение температуры [°C];

η – эффективность (efficiency) [%];

θ – фаза [рад];

λ – длина волны [м];

μ – среднее значение или показатель наклона девиации Аллана;

ξ – случайная величина (белый шум);

σ – стандартное отклонение;

σ_x – СКО отклонения фазы [нс];

$\sigma_y(\tau)$ – двухвыборочная девиация Аллана на интервале τ [безразмерная];

$\sigma_z(\tau)$ – параболическая девиация на интервале τ [безразмерная];

mod $\sigma_y(\tau)$ – модифицированная девиация Аллана [безразмерная];

τ – интервал усреднения [с];

τ_0 – базовый интервал измерений [с];

φ – фаза [рад];

Ω – угловая частота [рад/с].

3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ОПЕРАТОРЫ

⟨·⟩ – оператор усреднения;

Σ – оператор суммирования;

Π – оператор произведения;

∫ – оператор интегрирования;

∂/∂t – частная производная по времени;

d/dt – полная производная по времени;

∇ – оператор градиента;

~ – распределён как (например, $x \sim N(\mu, \sigma^2)$);

≈ – приблизительно равно;

∝ – пропорционально;

→ – стремится к;

$^{-1}$ – обратная величина или обратная матрица;

^{T} – транспонирование матрицы;

||·|| – норма вектора;

diag(·) – диагональная матрица;

E[·] – математическое ожидание;

Var[·] – дисперсия;

Cov[·,·] – ковариация.

4. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

нс (ns) – наносекунда = 10^{-9} с;

пс (ps) – пикосекунда = 10^{-12} с;

мкс (μs) – микросекунда = 10^{-6} с;

мс (ms) – миллисекунда = 10^{-3} с;

с (s) – секунда;

сут (day) – сутки = 86400 с;

МГц (MHz) – мегагерц = 10^6 Гц;

Гц (Hz) – герц (единица частоты);

°С – градус Цельсия;

К (K) – кельвин;

Вт (W) – ватт;

кВА (kVA) – киловольт-ампер;

ГБ (GB) – гигабайт = 10^9 байт;

МБ (MB) – мегабайт = 10^6 байт;

КБ (KB) – килобайт = 10^3 байт;

бод (baud) – единица скорости передачи данных;

Mbit/s – мегабит в секунду.

Перечень сокращений и условных обозначений

ALGOS – Algorithme pour la Génération d'Opérations Statistiques (алгоритм формирования TAI, используемый BIPM);

BIPM – Bureau International des Poids et Mesures (Международное бюро мер и весов);

CCTF – Consultative Committee for Time and Frequency (Консультативный комитет по времени и частоте);

CGGTTS – CCTF Group on GNSS Time Transfer Standards (формат данных для сравнения времени по ГНСС);

Circular T – ежемесячная публикация BIPM с окончательными данными [UTC - UTC(k)];

CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник);

DDS – Direct Digital Synthesis (прямой цифровой синтез);

FFM – Flicker Frequency Modulation (фликкер-шум частоты);

FPM – Flicker Phase Modulation (фликкер-шум фазы);

FTP – File Transfer Protocol (протокол передачи файлов);

GNSS – Global Navigation Satellite System (глобальная навигационная спутниковая система);

GPS – Global Positioning System (глобальная система позиционирования, США);

GTR55 – модель двухчастотного ГНСС-приёмника производства MESIT;

GUM – Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (руководство по выражению неопределённости измерений);

H-maser – hydrogen maser (водородный мазер);

HROG – High Resolution Oscillator Group (управляемый кварцевый генератор, модель HROG-5);

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers (Институт инженеров электротехники и электроники);

IGS – International GNSS Service (Международная служба ГНСС);

KZ – код Республики Казахстан (Kazakhstan);

LQG – Linear Quadratic Gaussian (линейно-квадратичное гауссовское управление);

MAD – Median Absolute Deviation (медианное абсолютное отклонение);

MJD – Modified Julian Date (модифицированная юлианская дата);

MTBF – Mean Time Between Failures (среднее время между отказами);

NIST – National Institute of Standards and Technology (Национальный институт стандартов и технологий, США);

NPL – National Physical Laboratory (Национальная физическая лаборатория, Великобритания);

NTP – Network Time Protocol (протокол синхронизации времени по сети Интернет);

PHM – Passive Hydrogen Maser (пассивный водородный стандарт частоты; термин «maser» закрепился как условное обозначение, хотя в ПВСЧ режим автогенерации не реализован [14]);

PI – Proportional-Integral (пропорционально-интегральный регулятор);

PID – Proportional-Integral-Derivative (пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор);

PPP – Precise Point Positioning (точное абсолютное позиционирование);

PPS – Pulse Per Second (импульс в секунду, 1 PPS = сигнал 1 Гц);

PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Физико-технический федеральный институт, Германия);

Q-Q plot – Quantile-Quantile plot (квантильный график для проверки распределения);

RAM – Random Access Memory (оперативная память);

RWFM – Random Walk Frequency Modulation (шум случайных блужданий частоты);

SU – Soviet Union / Russia (код бывшего СССР, используется ВНИИФТРИ);

TAI – Temps Atomique International (Международное атомное время);

TCP/IP – Transmission Control Protocol / Internet Protocol (протокол управления передачей / интернет-протокол);

TL – Taiwan Laboratory (Тайваньская лаборатория);

TTL – Transistor-Transistor Logic (транзисторно-транзисторная логика);

TWSTFT – Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (двусторонняя спутниковая передача времени и частоты);

USNO – United States Naval Observatory (Военно-морская обсерватория США);

UTC – Coordinated Universal Time (Всемирное координированное время);

UTC(k) – реализация UTC национальной лабораторией k;

UTC(KZ) – национальная шкала времени Республики Казахстан;

UTCr – Rapid UTC (оперативная реализация UTC, публикуемая еженедельно);

VCH – обозначение серии оборудования производства АО «Время-Ч» (Н. Новгород, Россия);

VCH-1008 – модель пассивного водородного стандарта частоты;

VCH-315M – модель многоканального компаратора частоты;

VCH-317 – модель управляемого синтезатора частоты;

VCH-A18 – модель климатической камеры;

WFM – White Frequency Modulation (белый частотный шум);

WPN – White Phase Noise (белый фазовый шум);

WPM – White Phase Modulation (белая фазовая модуляция);

ВНИИФТРИ – Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (г. Менделеево, Московская обл., Россия);

ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система;

ГЭВЧ РК – Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени Республики Казахстан;

ДИ – доверительный интервал;

ИВТМ-7М – измеритель влажности и температуры, модель 7М (производство АО «ЭКСИС»);

ПИ – пропорционально-интегральный (регулятор);

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный (регулятор);

ПВСЧ – пассивный водородный стандарт частоты;

РК – Республика Казахстан;

СКО – среднеквадратическое отклонение;

СУБД – система управления базами данных;

ТКЧ – температурный коэффициент частоты.

Литература

1. BIPM. The International System of Units (SI Brochure). 9th ed. Sèvres: BIPM, 2019. 216 p.

2. Резолюция 1 XIII Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) «Определение единицы времени СИ (секунды)». Париж: ГКМВ, 1967.

3. BIPM. Annual Report of the BIPM Time Department. Sèvres: BIPM, 2025.

4. BIPM. Circular T. Sèvres: BIPM, 2026. ISSN 1143-2519.

5. BIPM. CCTF WGMRA Guideline 8: Technical requirements for time laboratories for participation in UTC. Sèvres: BIPM, 2017. 2 p.

6. ITU-T. Recommendation G.8272/Y.1367: Timing characteristics of primary reference time clocks. Geneva: ITU-T, 2018.

7. ITU-T. Recommendation G.8272.1: Timing characteristics of enhanced primary reference time clocks. Geneva : ITU-T, 2024.

8. European Securities and Markets Authority. Commission Delegated Regulation (EU) 2017/574 (RTS 25): Regulatory technical standards for the level of accuracy of business clocks. Brussels: Official Journal of the European Union, 2017.

9. IEC/IEEE 61850-9-3:2016: Communication networks and systems for power utility automation — Part 9-3: Precision time protocol profile for power utility automation. Geneva: IEC/IEEE, 2016.

10. Vanier J., Audoin C. The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards. Bristol: Adam Hilger, 1989. Vol. 1–2.

11. Vanier J., Tomescu C. The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards: Recent Developments. Boca Raton: CRC Press, 2015. 1076 p.

12. Jefferts S.R., Shirley J., Parker T.E. et al. Accuracy evaluation of NIST-F1 // Metrologia. 2002. Vol. 39. No. 4. P. 321–336.

13. Heavner T.P., Donley E.A., Levi F. et al. First accuracy evaluation of NIST-F2 // Metrologia. 2014. Vol. 51. No. 3. P. 174–182.

14. Басистый А.И., Блинов И.Ю., Курнаков А.В. и др. Современное состояние и перспективы развития пассивных водородных стандартов частоты // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58. № 8. С. 677–689.

15. Dai J., Liu T., Cai Y., Chen Z., Li Q. Review of the development of the hydrogen maser technique and a brief introduction to its space applications // Frontiers in Physics. 2022. Vol. 10. Art. 995361. DOI: 10.3389/fphy.2022.995361.

16. BIPM. Rapid UTC (UTCr) [Электронный ресурс]. URL: https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/utcrapid/ (дата обращения: 01.12.2024).

17. Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards // Proceedings of the IEEE. 1966. Vol. 54. No. 2. P. 221–230. DOI: 10.1109/PROC.1966.4634.

18. IEEE Standard 1139-2022: IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology — Random Instabilities. New York: IEEE, 2022. 60 p.

19. Petit G., Jiang Z. GPS All in View time transfer for TAI computation // Metrologia. 2008. Vol. 45. No. 1. P. 35–45.

20. Petit G., Harmegnies A., Mercier F. et al. The time stability of PPP links for TAI // Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium. Baltimore, MD, USA, 21–24 May 2012. New York: IEEE, 2012. P. 1–5.

21. Lewandowski W., Azoubib J., Klepczynski W.J. GPS: Primary tool for time transfer // Proceedings of the IEEE. 1999. Vol. 87. No. 1. P. 163–172.

22. Allan D.W., Thomas C. Technical directives for standardization of GPS time receiver software // Metrologia. 1994. Vol. 31. No. 1. P. 69–79.

23. Kouba J., Héroux P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products // GPS Solutions. 2001. Vol. 5. No. 2. P. 12–28.

24. Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // Journal of Geodesy. 2009. Vol. 83. No. 3–4. P. 191–198.

25. Weiss M., Allan D.W., Peppler T.K. A study of the NBS time scale algorithm // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1989. Vol. 38. No. 2. P. 631–635.

26. Vernotte F., Lantz E., Delporte J., Brunet M. Uncertainties of drift coefficients and extrapolation errors: application to clock error prediction // Metrologia. 2001. Vol. 38. No. 4. P. 325–342.

27. Tavella P. Atomic time scales: construction and applications // La Rivista del Nuovo Cimento. 2000. Vol. 23. No. 8. P. 1–43.

28. Panfilo G., Harmegnies A., Tisserand L. A new prediction algorithm for the generation of International Atomic Time // Metrologia. 2012. Vol. 49. No. 1. P. 49–56.

29. Brown K.R. The theory of the GPS composite clock // Proceedings of the 4th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS-91). Albuquerque, NM, USA, 11–13 Sep. 1991. Washington: ION, 1991. P. 223–242.

30. Greenhall C.A. Forming stable timescales from the Jones-Tryon Kalman filter // Metrologia. 2003. Vol. 40. No. 3. P. S335–S341.

31. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82. No. 1. P. 35–45.

32. Anderson B.D.O., Moore J.B. Optimal Control: Linear Quadratic Methods. Mineola: Dover Publications, 2007. 448 p.

33. Åström K.J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2nd ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995. 343 p.

34. Донченко С.С., Кучеров Р.Я., Палий А.А. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012 // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 3–8.

35. Смагулов С.Б. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени Республики Казахстан // Альманах современной метрологии. 2024. № 1. С. 124–136.

36. Багаев С.Н., Басистый А.И., Блинов И.Ю. и др. Пассивный водородный стандарт частоты Ч1-76 // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 12. С. 1101–1106.

37. Время-Ч. Пассивный водородный стандарт частоты VCH-1008: технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: https://vremya-ch.com/index.php/en/products-en/passivehm-en/vch-1008-en/index.html (дата обращения: 01.12.2024).

38. Jaduszliwer B., Camparo J. Past, present and future of atomic clocks for GNSS // GPS Solutions. 2021. Vol. 25. Art. 27. DOI: 10.1007/s10291-020-01059-x.

39. Petit G., Arias F., Harmegnies A., Panfilo G., Tisserand L. UTCr: a rapid realization of UTC // Metrologia. 2014. Vol. 51. No. 1. P. 33–39.

40. Šarčević S., Šibonjić O. Maintenance of official time in Bosnia and Herzegovina — UTC(IMBH) // Proceedings of the 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA. East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 21–23 Mar. 2018. East Sarajevo: University of East Sarajevo, 2018.

41. Bauch A., Weyers S., Piester D., Staliuniene E., Yang W. Generation of UTC(PTB) as a fountain-clock-steered time scale // Metrologia. 2012. Vol. 49. No. 3. P. 180–188.

42. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Sèvres: JCGM, 2008. 134 p.

43. Mishagin K.G., Lysenko V.A., Medvedev S.Yu. A practical approach to optimal control problem for atomic clocks // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2020. Vol. 67. No. 5. P. 1080–1087.

44. BIPM. Weights used in the computation of International Atomic Time (TAI) [Электронный ресурс]. URL: https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/weights/ (дата обращения: 15.10.2025).

45. Смагулов С.Б., Мишагин К.Г. Ведение национальной шкалы времени UTC(KZ) на пассивных водородных стандартах по данным Rapid UTC // Измерительная техника. 2024. № 9. С. 35–42.

46. Smagulov S.B., Mishagin K.G., Kagan S.N. et al. Experimental Study of Uncertainty in Comparing Time Scales of National Standards of Kazakhstan and Russia on the Internet Using NTP Servers // Russian Physics Journal. 2023. Vol. 66. No. 4. P. 591–596. DOI: 10.1007/s11182-023-02980-7.

47. Smagulov S.B., Mishagin K.G. Steering of the national time scale UTC(KZ) based on passive hydrogen masers according to the rapid UTC data // Measurement Techniques. 2024. Vol. 67. No. 9. P. 684–692. DOI: 10.1007/s11018-025-02389-3.

48. Смагулов С.Б. Перспективы развития систем синхронизации в сетях связи и инфраструктурных объектах Республики Казахстан // SMART. 2025. № 3 (93). С. 49–65.

49. Смагулов С.Б. Сравнение коммерческих и новых атомных стандартов частоты: текущее развитие и будущие направления // SMART. 2024. № 1 (87). С. 46–52.

50. Смагулов С.Б., Мишагин К.Г., Семёнов С.А. и др. Сличение шкал времени NTP-серверов РГП «КазСтандарт» и ФГУП «ВНИИФТРИ» // SMART. 2023. № 3 (84). С. 32–36.

51. Смагулов С.Б. О необходимости модернизации Государственного первичного эталона времени и частоты Республики Казахстан // Метрология. 2020. № 3 (74). С. 6–11.

52. Smagulov S.B., Mishagin K.G. Evaluation of time scale prediction uncertainty for passive hydrogen masers // Proceedings of the XI International Competition of the Best Young Metrologist of COOMET. Tashkent, Uzbekistan, 2025. Tashkent, 2025. P. 73–80.

53. Смагулов С.Б., Мишагин К.Г. Анализ долговременных характеристик пассивных водородных стандартов частоты и времени // Актуальные проблемы радиофизики АПР-2025 : сборник трудов 11-й Международной научно-практической конференции. Томск, 16–18 сент. 2025 г. Томск: Издательский дом ТГУ, 2025. С. 198–200.

54. Смагулов С.Б., Мишагин К.Г. Анализ долговременных характеристик пассивных водородных стандартов частоты и времени // Сборник тезисов докладов III Международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «За нами будущее» и пилотного Международного конкурса «Лучший молодой метролог МГС СНГ-2024». Санкт-Петербург, 2024. С. 195–199.

55. Смагулов С.Б., Мишагин К.Г. Реализация метода автоподстройки национальной шкалы времени UTC(KZ) с помощью еженедельных данных Rapid UTC // Сборник тезисов докладов II Международной научно-практической конференции молодых учёных и

специалистов «За нами будущее» и X Международного конкурса «Лучший молодой метролог КООМЕТ-2023». Екатеринбург, 2023. С. 29–35.

56. Смагулов С.Б., Юрченко А.В. Алгоритм формирования национальной шкалы времени UTC(KZ) на основе пассивных водородных стандартов частоты и времени // Сборник материалов V Международного форума «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции». Томск: STT, 2023. С. 44–46.

57. Smagulov S.B., Mishagin K.G. Steering of national time scale UTC(KZ) based on passive hydrogen masers using rapid UTC data [Электронный ресурс]: Scientific poster // BIPM 150th Anniversary. Sèvres, France, 2025. URL: https://thebipm150.org/posters-online (дата обращения: 01.12.2025).

58. Смагулов С.Б., Юрченко А.В. Анализ точности ведения национальной шкалы времени UTC(KZ) по данным Rapid UTC // Сборник материалов VI Международного форума «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции». Томск: STT, 2024. С. 41–42.

59. Смагулов С.Б., Мишагин К.Г., Семёнов С.А., Каган С.Н., Болсынов М.Ы., Жумагали А.К. Сличение шкал времени NTP-серверов РГП «КазСтандарт» и ФГУП «ВНИИФТРИ» // Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023: сборник трудов X Международной научно-практической конференции. Томск, 26–29 сент. 2023 г. Томск: Издательский дом ТГУ, 2023. С. 323–327.

60. Смагулов С.Б., Мишагин К.Г. Анализ точности ведения национальной шкалы времени UTC(KZ) по данным Rapid UTC // Метрология времени и пространства: материалы XI Международного симпозиума. Московская область, 27–29 сент. 2023 г. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2023. С. 10–12.

61. СТ РК 2.32-2010. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты.

62. Parker T.E. Long-term comparison of caesium fountain primary frequency standards // Metrologia. 2010. Vol. 47. No. 1. P. 1–10.

63. Peil S., Hanssen J.L., Swanson T.B., Taylor J., Ekstrom C.R. Evaluation of long-term performance of continuously running atomic fountains // Metrologia. 2014. Vol. 51. No. 3. P. 263–269.

64. ГОСТ Р 8.000–2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019.

65. Levine J. A review of time and frequency transfer methods // Metrologia. 2008. Vol. 45. No. 6. P. S162–S174.

66. Piester D., Bauch A., Breakiron L., Matsakis D., Blanzano B., Koudelka O. Time transfer with nanosecond accuracy for the realization of International Atomic Time // Metrologia. 2008. Vol. 45. No. 2. P. 185–198. DOI: 10.1088/0026-1394/45/2/008.

67. ITU-R. Recommendation TF.1153-4: The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing pseudorandom noise codes. Geneva: ITU-R, 2015.

68. BIPM. CCTF WGMRA Guideline 9: CCTF criteria for obtaining traceability in time and frequency [Электронный ресурс]. URL: https://www.bipm.org (дата обращения: 01.12.2024).

69. Riley W.J. Handbook of Frequency Stability Analysis [Электронный ресурс]: NIST Special Publication 1065. Gaithersburg: NIST, 2008. 136 p. URL: https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1065 (дата обращения: 01.12.2024). DOI: 10.6028/NIST.SP.1065.

70. Allan D.W., Barnes J.A. A modified Allan variance with increased oscillator characterization ability // Proceedings of the 35th Annual Frequency Control Symposium. Philadelphia, PA, USA, 27–29 May 1981. New York: IEEE, 1981. P. 470–474.

71. Howe D.A. Total Variance Explained // Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium. Besançon, France, 13–16 Apr. 1999. New York: IEEE, 1999. P. 1093–1099.

72. Greenhall C.A., Howe D.A., Percival D.B. Total variance, an estimator of long-term frequency stability // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1999. Vol. 46. No. 5. P. 1183–1191.

73. Howe D.A. The total deviation approach to long-term characterization of frequency stability // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2000. Vol. 47. No. 5. P. 1102–1110.

74. Galleani L., Tavella P. The characterization of clock behavior with the dynamic Allan variance // Proceedings of the Joint IEEE FCS/EFTF. Tampa, FL, USA, 5–8 May 2003. New York : IEEE, 2003. P. 239–244.

75. Howe D.A. ThêoH: A hybrid, high-confidence statistic that improves on the Allan deviation // Metrologia. 2006. Vol. 43. No. 4. P. S322–S331.

76. Vernotte F., Lantz E., Giordano V., Rubiola E. The parabolic variance (PVAR): a wavelet variance generalizing the Allan variance // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2016. Vol. 63. No. 4. P. 611–623. DOI: 10.1109/TUFFC.2015.2505302.

77. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS / пер. с англ. М.: Техносфера, 2002. 400 с.

78. Galleani L., Sacerdote L., Tavella P., Zucca C. A mathematical model for the atomic clock error // Metrologia. 2003. Vol. 40. No. 3. P. S257–S264.

79. Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: итоги развития за пятнадцать лет // ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 9. С. 70–101.

80. Koppang P., Leland R. Linear quadratic stochastic control of atomic hydrogen masers // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1999. Vol. 46. No. 3. P. 517–522.

81. Mattioni L., Belloni M., Binda F. et al. Space passive hydrogen maser — Performance on the Galileo satellites // Proceedings of the 2016 European Frequency and Time Forum (EFTF). York, UK, 4–7 Apr. 2016. New York: IEEE, 2016. P. 1–4.

82. ГОСТ 8.567–2014. Измерения времени и частоты. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2019.

83. Vernotte F., Lenczner M., Bourgeois P.Y., Rubiola E. Estimation of the uncertainty of a phase comparison // Metrologia. 2016. Vol. 53. No. 1. P. S57–S64.

84. Panfilo G. The coordinated universal time (UTC) // Metrologia. 2019. Vol. 56. Art. 042001. DOI: 10.1088/1681-7575/ab1cc0.

85. Мишагин К.Г., Медведев С.Ю. Реализация метода оптимальной автоподстройки шкалы времени атомных часов // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 51–55. DOI: 10.32446/0368-1025it.2021-8-51-55.

86. Мишагин К.Г. Синхронизация атомных часов: учебно-методическое пособие. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. 26 с.

87. Zucca C., Tavella P. The clock model and its relationship with the Allan and related variances // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2005. Vol. 52. No. 2. P. 289–296.

88. Wu Y., Zhu X., Huang Y., Sun G., Ou G. Optimal Observation Intervals for Clock Prediction Based on the Mathematical Model Method // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016. Vol. 65. No. 1. P. 132–143. DOI: 10.1109/TIM.2015.2477158.

89. Galleani L., Tavella P. Time and the Kalman filter // IEEE Control Systems Magazine. 2010. Vol. 30. No. 2. P. 44–65. DOI: 10.1109/MCS.2009.935568.

90. Davis J.A., Shemar S.L., Whibberley P.B. A Kalman filter UTC(k) prediction and steering algorithm // Proceedings of the Joint Conference IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum. San Francisco, CA, USA, 2–5 May 2011. New York: IEEE, 2011. P. 1–6.

91. Tavella P., Thomas C. Comparative study of time scale algorithms // Metrologia. 1991. Vol. 28. No. 1. P. 57–63.

92. Farina M., Galleani L., Tavella P., Bittanti S. A control theory approach to clock steering techniques // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2010. Vol. 57. No. 10. P. 2257–2270.

93. Mishagin K.G. Steering of UTC(KZ): исходный код модели [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/konstantin-gm/Steering/blob/master/utcr_kz_kalman.py (дата обращения: 30.06.2024).

94. Panfilo G., Tavella P. Atomic clock prediction based on stochastic differential equations // Metrologia. 2008. Vol. 45. No. 6. P. S108–S116. DOI: 10.1088/0026-1394/45/6/S16.

95. Wu Y., Zhu X., Huang Y., Sun G., Ou G. Uncertainty Derivation and Performance Analyses of Clock Prediction Based on Mathematical Model Method // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2015. Vol. 64. No. 10. P. 2792–2801. DOI: 10.1109/TIM.2015.2418683.

96. Matsakis D.N., Slavney M. Optimal Oscillator Modelling for GNSS-Disciplined Clock Holdover // Proceedings of the 56th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. Long Beach, CA, USA, January 2025. Washington: ION, 2025. P. 54–70. DOI: 10.33012/2025.19958.

97. Weiss M., Ascarrunz F., Parker T. et al. Effects of antenna cables on GPS timing receivers // Proceedings of the Joint Meeting IEEE FCS and 13th EFTF. Besançon, France, 13–16 Apr. 1999. New York: IEEE, 1999. P. 259–262.

98. Report to the Kazakhstan national metrology institute KazStandard on the performance of UTC(KZ) / Bureau International des Poids et Mesures, Time Department; Dr. P. Tavella. Sèvres: BIPM, 2026. 13 p.

99. Defraigne P. GNSS Time and Frequency Transfer // Springer Handbook of Time and Frequency / ed. G. Arias. Cham: Springer, 2023. P. 553–600.

100. Rovera D., Chupin B., Defraigne P. et al. Link calibration against receiver calibration: an assessment of GPS time transfer uncertainties // Metrologia. 2014. Vol. 51. No. 5. P. 476–490. DOI: 10.1088/0026-1394/51/5/476.

101. Defraigne P., Petit G. CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS time transfer // Metrologia. 2015. Vol. 52. No. 6. P. G1–G12. DOI: 10.1088/0026-1394/52/6/G1.

102. GPS calibration of KZ equipment with respect to SU: Report 1202-2021. Sèvres: BIPM, 2021.

103. Ray J., Senior K. Temperature sensitivity of timing measurements using Dorne Margolin antennas // GPS Solutions. 2003. Vol. 7. No. 2. P. 128–136.

104. BIPM guidelines for GNSS calibration. V4.0. Sèvres: BIPM, 2021.

105. Feldmann T., Bauch A., Piester D. et al. Advanced GPS-based time link calibration with PTB's new GPS calibration setup // Proceedings of the 42nd Annual PTTI Meeting. Reston, VA, USA, 15–18 Nov. 2010. Washington: U.S. Naval Observatory, 2011. P. 509–526.

106. Calibration report 1202-2021/V2.0: Transfer of calibration from KZ04 to KZ03. Sèvres: BIPM, 2022.

107. Defraigne P., Bruyninx C. GNSS Time and Frequency Transfer // Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / eds. P. Teunissen, O. Montenbruck. Cham: Springer, 2017. P. 1187–1206.

108. Harmegnies A., Defraigne P., Petit G. Combining GPS and GLONASS in all-in-view for time transfer // Metrologia. 2013. Vol. 50. No. 3. P. 277–287. DOI: 10.1088/0026-1394/50/3/277.

109. BIPM Time Department Data Base [Электронный ресурс]. URL: https://webtai.bipm.org/database/ (дата обращения: 15.03.2026).

110. Defraigne P., Petit G. Time transfer to TAI using geodetic receivers // Metrologia. 2003. Vol. 40. No. 4. P. 184–188. DOI: 10.1088/0026-1394/40/4/307.

111. Rieck C., Jaldehag R., Jarlemark P. Thermal influence on the receiver chain of GPS carrier phase equipment for time and frequency transfer // Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium. Tampa, FL, USA, 5–8 May 2003. New York: IEEE, 2003. P. 326–331.

112. Elósegui P., Davis J.L., Jaldehag R.T.K. et al. Geodesy using the Global Positioning System: The effects of signal scattering on estimates of site position // Journal of Geophysical Research. 1995. Vol. 100. No. B6. P. 9921–9934.

113. Постановление Правительства Республики Казахстан от 23 ноября 2000 г. № 1749 «О порядке исчисления времени на территории Республики Казахстан».

114. Greenhall C.A. Optimal steering by frequency and phase measurements // Proceedings of the 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting. Reston, VA, USA, 3–5 Dec. 2002. Washington: U.S. Naval Observatory, 2002. P. 259–268.

115. Sullivan D.B., Allan D.W., Howe D.A., Walls F.L. Characterization of Clocks and Oscillators: NIST Technical Note 1337. Boulder: NIST, 1990. 352 p.

116. Ray J., Senior K. Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements // Metrologia. 2005. Vol. 42. No. 4. P. 215–232. DOI: 10.1088/0026-1394/42/4/005.

117. ВНИИФТРИ. ГЭТ 1-2018: Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени [Электронный ресурс]. URL: https://vniiftri.ru (дата обращения: 01.12.2024).

118. Норец И.Б., Смирнов Ю.Ф., Глазов Е.Ю., Федотов В.Н. Результаты совершенствования Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1 // Альманах современной метрологии. 2022. № 3 (31). С. 8–21.

119. Mills D.L. Computer Network Time Synchronization: The Network Time Protocol on Earth and in Space. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 466 p.

120. Rarog R.N. Comparison of time scales of NTP servers using the Internet // Ukrainian Metrological Journal. 2015. No. 2. P. 17–20.

Приложения

Приложение А. Акты о внедрении результатов диссертационной работы

РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
НА ПРАВЕ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ВЕДЕНИЯ
«КАЗАХСТАНСКИЙ ИНСТИТУТ СТАНДАРТИЗАЦИИ
И МЕТРОЛОГИИ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
РГП «КазСтандарт»
_____ Мухамеджанов Б.Ж.
«29» 03 2023 г.

АКТ
о внедрении результатов

Настоящий акт составлен о том, что результаты работы Смагулова Султанбека Берикулы «Реализация метода автоподстройки национальной шкалы времени UTC(KZ) с помощью еженедельных данных Rapid UTC», представленной на Международной научно-практической конференции «ЗА НАМИ БУДУЩЕЕ» и Международном конкурсе «Лучший молодой метролог КООМЕТ-2023», внедрены в Республиканском государственном предприятии «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» (РГП «КазСтандарт»).

Внедрены следующие результаты:

1. Алгоритм автоматической подстройки национальной шкалы времени UTC(KZ) на основе PI-регулятора с использованием еженедельных данных Rapid UTC с параметрами: интервал управления – 7 суток, постоянная времени – 10 суток ($g_x = 4{,}2 \cdot 10^{-7}$, $g_\gamma = 0{,}75$).
2. Методика расчета управляющего воздействия путем коррекции частоты выходного сигнала эталона с учетом линейной аппроксимации отклонений по фазе и частоте.
3. Программное обеспечение для автоматической коррекции шкалы атомного времени на основе данных UTCr с еженедельным интервалом управления.

Экономический эффект от внедрения:

- Обеспечена среднеквадратическая погрешность (СКП) шкалы времени UTC(KZ) при использовании UTCr: 1,11 нс (СКП за весь период: 1,55 нс).
- Максимальное по модулю отклонение UTC(KZ) от UTC составило: 3,9 нс.
- Реализована первая в мире национальная шкала времени на основе только пассивных водородных стандартов частоты с автоматической подстройкой по данным UTCr.
- Избежаны капитальные затраты на приобретение активных водородных мазеров ориентировочной стоимостью ~$2,5 млн.

РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
НА ПРАВЕ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ВЕДЕНИЯ
«КАЗАХСТАНСКИЙ ИНСТИТУТ СТАНДАРТИЗАЦИИ
И МЕТРОЛОГИИ»

«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель генерального
директора РГП «КазСтандарт»
_____ А. Әбілда
«23» ____10_____ 2024 г.

АКТ
о внедрении результатов

Настоящий акт составлен о том, что результаты работы Смагулова Султанбека Берикулы «Анализ долговременных характеристик пассивных водородных стандартов частоты и времени», представленной на III Международной научно-практической конференции «ЗА НАМИ БУДУЩЕЕ» и пилотном Международном конкурсе «Лучший молодой метролог МГС СНГ» 2024 года, внедрены в Республиканском государственном предприятии «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» (РГП «КазСтандарт»).

Внедрены следующие результаты:

1. Система автоматической компенсации дрейфа частоты пассивных водородных стандартов VCH-1008, обеспечивающая коррекцию кода синтезатора на 10^{-15} с расчетным периодом в зависимости от величины дрейфа.
2. Методика оценки температурного коэффициента частоты (ТКЧ) пассивных водородных стандартов и программная термокомпенсация частоты по данным датчика температуры.
3. Комплекс мер по обеспечению термостабилизации с использованием климатических камер VCH-A18 с поддержанием температуры в пределах ± 0,2 ºС.

Экономический эффект от внедрения:

- Усредненные суточные дрейфы частоты стандартов после компенсации составили: $1{,}25\cdot10^{-17}\pm1{,}34\cdot10^{-17}$, $2{,}31\cdot10^{-17}\pm1{,}09\cdot10^{-17}$, $-1{,}33\cdot10^{-17}\pm1{,}33\cdot10^{-17}$ (уменьшение более чем на порядок).
- Суточная нестабильность частоты стандартов в климатических камерах достигла уровня ~10^{-15}, что соответствует характеристикам активных водородных стандартов предыдущего поколения.
- Коэффициент температурной зависимости частоты составил $3{,}72\cdot10^{-15}\pm8\cdot10^{-17}$ на 1°C, что в 2,7 раза лучше требований спецификации VCH-1008 ($\leq1\cdot10^{-14}$).
- Обеспечена стабильная работа ГЭВЧ на интервале наблюдения более 2 лет с высокими метрологическими характеристиками.

РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
НА ПРАВЕ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ВЕДЕНИЯ
«КАЗАХСТАНСКИЙ ИНСТИТУТ СТАНДАРТИЗАЦИИ
И МЕТРОЛОГИИ»

«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель генерального
директора РГП «КазСтандарт»
_____ А. Әбілда
«25» 04 2025 г.

АКТ
о внедрении результатов

Настоящий акт составлен о том, что результаты работы Смагулова Султанбека Берикулы «Анализ неопределенности прогноза шкал времени пассивных водородных стандартов частоты», представленной на XI Международном конкурсе «Лучший молодой метролог КООМЕТ-2025», внедрены в Республиканском государственном предприятии «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» (РГП «КазСтандарт»).

Внедрены следующие результаты:

1. Упрощенная формула оценки неопределенности линейного прогноза ухода шкалы времени на основе девиации Аллана: $u^2(\hat{X}_1(t_k+t_p)) = \sigma^2 + u^2_\gamma(T)\cdot t^2_p$, не требующая оценки параметров стохастической модели.
2. Методика определения оптимального интервала наблюдения (времени обучения модели) для минимизации ошибки прогнозирования шкалы времени пассивных водородных стандартов по данным UTCr.
3. Алгоритм линейного прогнозирования шкалы времени с учетом задержки данных UTCr (3-4 дня) для расчета текущего расхождения и управляющего воздействия.

Экономический эффект от внедрения:

- Погрешность прогноза шкалы времени на 2 недели составляет ~5 нс, на 30 суток – не более 15 нс при времени оценивания 5-20 суток.
- Определен оптимальный интервал оценивания параметров модели: 9 суток (экспериментально) и 13 суток (аналитически), при этом используемый интервал в 7 суток близок к оптимальному.
- Показано, что ошибка прогноза слабо зависит от интервала оценивания в диапазоне 5-20 суток, что обеспечивает гибкость системы управления.
- Повышена точность синхронизации UTC(KZ) с UTC за счет улучшенного прогнозирования и компенсации задержки данных UTCr.
- Результаты применимы для использования пассивных водородных стандартов в качестве бортовых часов ГНСС (Galileo, BeiDou, ГЛОНАСС).

РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
НА ПРАВЕ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ВЕДЕНИЯ
«КАЗАХСТАНСКИЙ ИНСТИТУТ СТАНДАРТИЗАЦИИ
И МЕТРОЛОГИИ»

«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель генерального
директора РГП «КазСтандарт»
_____А. Әбілда
«25» ____04_____2025 г.

АКТ
о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Смагулова Султанбека Берикулы «Применение пассивных водородных стандартов частоты для формирования национальных шкал атомного времени», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в Республиканском государственном предприятии «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» (РГП «КазСтандарт»).

Внедрены следующие результаты:

1. Алгоритм автоматической подстройки национальной шкалы времени UTC(KZ) на основе PI-регулятора с использованием еженедельных данных Rapid UTC.
2. Система автоматической компенсации дрейфа частоты пассивных водородных стандартов VCH-1008.
3. Методика оценки температурного коэффициента частоты и программная термокомпенсация по данным датчика температуры.
4. Упрощенная формула оценки неопределенности линейного прогноза ухода шкалы времени на основе девиации Аллана.
5. Алгоритм линейного прогнозирования шкалы времени с учетом задержки данных UTCr для расчета управляющего воздействия.
6. Программное обеспечение для автоматического управления Государственным первичным эталоном единиц времени, частоты и национальной шкалы времени.

Приложение Б. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

СВИДЕТЕЛЬСТВО

О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ

№ 68403 от «6» марта 2026 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):
СМАГУЛОВ СУЛТАНБЕК БЕРИКУЛЫ

Вид объекта авторского права: **компьютерные программы (программное обеспечение)**

Название объекта: **Система мониторинга UTC(KZ)**

Дата создания объекта: **03.03.2026**

Қазақстан Республикасының https://www.kazpatent.kz/ru сайтының "Авторлық құқық" бөлімінде тексеруге болады https://copyright.kazpatent.kz

Подлинность документа возможно проверить на сайте kazpatent.kz в разделе «Авторское право» https://copyright.kazpatent.kz

Подписано ЭЦП

С. Ахметов

Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом (Республика Казахстан) № 68403 от 06.03.2026 / Смагулов С.Б. Система мониторинга UTC(KZ).



ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

СВИДЕТЕЛЬСТВО

О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ

№ 68508 от «11» марта 2026 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):
СМАГУЛОВ СУЛТАНБЕК БЕРИКУЛЫ

Вид объекта авторского права: **компьютерные программы (программное обеспечение)**

Название объекта: **TimeLink KZ – Автоматизированная система управления службой точного времени ГЭВЧ РК**

Дата создания объекта: **09.03.2026**

Қазақстан Республикасының http://www.kazpatent.kz/ru сайтының "Авторлық құқық" бөлімінде тексеруге болады https://copyright.kazpatent.kz

Подлинность документа возможно проверить на сайте kazpatent.kz в разделе «Авторское право» https://copyright.kazpatent.kz

Подписано ЭЦП

С. Ахметов

Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом (Республика Казахстан) № 68508 от 11.03.2026 / Смагулов С.Б. TimeLink KZ – Автоматизированная система управления службой точного времени ГЭВЧ РК.

Приложение В. Сводная таблица параметров алгоритма управления

В таблице В.1 приведены числовые параметры алгоритма формирования национальной шкалы времени UTC(KZ). Коэффициенты регулятора приведены в размерностях, используемых в уравнениях Главы 2.

Таблица В.1 – Параметры алгоритма управления UTC(KZ)

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.	Формула/раздел
Параметры ПИ-регулятора (Глава 2)				
Интервал управления	Δt	7 (604 800)	сут (с)	(2.1), р. 2.5
Постоянная времени	T	10 (864 000)	сут (с)	(2.37), р. 2.5
Коэфф. по фазе	g_x	$4{,}2\times10^{-7}$	$с^{-1}$	(2.38), т. 2.4
Коэфф. по частоте	g_y	0,75	–	(2.39), т. 2.4
Время установления	$\tau_з$с	≈20 (эксп. 28)	сут	р. 4.3.1
Характер перех. процесса	–	Апериодический	–	т. 2.1, D1
Оценка фазы и частоты (Глава 2)				
Число точек МНК	N	7	–	(2.43)–(2.46)
Метод аппроксимации	–	Линейная, МНК	–	р. 2.6.1
Задержка данных UTCr	$\Delta t_{зад}$	≈3,5–4,3	сут	р. 2.6.1
День управления	–	Четверг, 08:00 UTC	–	р. 2.6
Компенсация дрейфа (Глава 1)				
Окно оценки дрейфа	T_{window}	30	сут	р. 1.3.3
Шаг оценки дрейфа	–	7	сут	р. 1.3.3
Дискрет VCH-317	$\Delta f/f$	1×10^{-15}	–	ЯКУР.024РЭ
Подавление дрейфа	–	≈200	раз	р. 1.3.3
Температурная компенсация (Глава 1)				
ТКЧ (РНМ 3)	b	$(3{,}72\pm0{,}08)\times10^{-15}$	$°C^{-1}$	т. 1.10
Нестабильность VCH-A18	–	±0,2	°C	р. 1.4.3
Фильтр выбросов (Глава 2)				
Порог фильтра	–	3·1,4826·MAD	–	(2.47)
Выбросы за 47 мес.	–	12 (≈0,5 %)	–	р. 4.4.2
Стохастическая модель РНМ 1 (Глава 2)				
Белый фазовый шум	q_0	$4{,}1\times10^{-26}$	с	(2.7)
Белый частотный шум	q_1	$7{,}2\times10^{-26}$	с	(2.7)
Случ. блужд. частоты	q_2	$2{,}4\times10^{-36}$	$с^{-1}$	(2.7)
Суточный дрейф	D	$1{,}2\times10^{-16}$	$сут^{-1}$	т. 1.7
Шумы UTCr	q_{0re}, q_{1re}	$8{,}0\times10^{-20}$; $8{,}5\times10^{-25}$	–	(2.8)
Целевые показатели				
СКО	σ_x	< 3	нс	Введение
Макс. отклонение	$\lvert x\rvert_{max}$	< 10	нс	Введение
Нестабильность частоты	σ_y(7 сут)	$< 1{,}2\times10^{-15}$	–	Введение

Продолжение таблицы В.1

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.	Формула/раздел
Достигнутые результаты (47 мес., Глава 4)				
СКО	σ_x	2,4	нс	т. 4.6
Макс. отклонение	$\lvert x \rvert_{max}$	8,9	нс	т. 4.6
Среднее	μ	- 0,12	нс	т. 4.6
Расширенная неопределённость GNSS-связи	U_{link} (k = 2)	см. Circular T	–	р. 4.2.2
Нестабильность частоты	σ_y(7 сут)	$1{,}15\times10^{-15}$	–	т. 4.11
Общее улучшение	–	>300 раз	–	т. 4.14

Примечания:

1 Коэффициент g_x приведён в $с^{-1}$, коэффициент gy – безразмерный; значения соответствуют точным формулам (2.38)–(2.39) при T = 10 суток и Δt = 7 суток.

2 Параметры модели идентифицированы по данным Главы 1, единицы СИ (с, $с^{-1}$).

3 Достигнутые результаты – за 47 месяцев (июнь 2022 – апрель 2026).

Приложение Г. Формат данных BIPM для формирования шкал UTC(k)

В настоящем приложении приведены форматы двух публикаций Международного бюро мер и весов (BIPM), используемых в алгоритме управления UTC(KZ): еженедельного бюллетеня Rapid UTC (UTCr) и ежемесячного Circular T. Формат данных документов нигде формально не стандартизирован; описание основано на анализе реальных файлов, загружаемых с сервера BIPM.

Г.1 Формат Rapid UTC (UTCr)

Бюллетень UTCr публикуется еженедельно (обычно в среду вечером по UTC) и содержит суточные значения разности [UTCr − UTC(k)] для всех лабораторий за предшествующую неделю (понедельник 00:00 UTC – воскресенье 00:00 UTC). Файл имеет текстовый формат ASCII с фиксированной шириной колонок. Номер выпуска имеет формат UTCr_ГГНН (ГГ – две последние цифры года, НН – номер недели ISO). Ниже приведён фрагмент реального файла UTCr_2608 от 25 февраля 2026 г. с выделением строки KZ (Astana).

Листинг Г.1 – Фрагмент файла UTCr_2608 (оригинальный формат BIPM)

```
UTCr_2608
2026 FEBRUARY 25, 11h UTC

                    BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
             THE INTERGOVERNMENTAL ORGANIZATION ESTABLISHED BY THE METRE CONVENTION
   PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70   tai@bipm.org

                           Computed values of [UTCr-UTC(k)]

Date 2026       0h UTC      FEB 16   FEB 17   FEB 18   FEB 19   FEB 20   FEB 21   FEB 22
       MJD                   61087    61088    61089    61090    61091    61092    61093
Laboratory k                                          [UTCr-UTC(k)]/ns

AOS   (Borowiec)               1.6      1.8      1.3      1.4      3.6      3.8      3.9
APL   (Laurel)                0.4      0.2     -0.2     -0.1     -0.1      0.2      0.0
...
CH    (Bern-Wabern)            0.5      0.7      0.6      0.7      0.8      0.7      0.9
...
KRIS  (Daejeon)                0.2      0.4     -0.1      0.2     -0.0      0.1     -0.3
KZ    (Astana)                 3.9      3.8      3.7      3.8      3.1      3.6      3.6
LRTE  (Sao Carlos)             1.2      0.4     -0.7      1.2      1.4      1.9      3.6
...
PTB   (Braunschweig)           1.3      1.5      1.2      1.4      1.4      1.2      1.3
...
SU    (Moskva)                 0.9      0.6      0.8      0.3      0.7      0.4      0.2
...
USNO  (Washington DC)          1.7      1.4      1.4      1.5      1.2      1.5      1.4
...

   UTC remains available from the monthly Circular T at
   (https://www.bipm.org/en/time-ftp/circular-t).
```

Г.2 Формат Circular T

Circular T – ежемесячный бюллетень BIPM, являющийся официальной финальной реализацией UTC. В отличие от UTCr, значения приводятся через 5 суток и включают оценки неопределённости трёх типов: u_A (тип A, статистическая), u_B (тип B, систематическая от калибровки) и u (суммарная, $u = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)}$). Секция 5 содержит параметры линков: тип связи, оборудование, идентификаторы калибровок и компоненты неопределённости. Ниже приведён фрагмент Circular T № 457 от 11 февраля 2026 г.

Листинг Г.2 – Фрагмент Circular T 457 (секции 1 и 5, оригинальный формат BIPM)

```
CIRCULAR T 457                                                ISSN 1143-1393
2026 FEBRUARY 11, 09h UTC
                    BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
              THE INTERGOVERNMENTAL ORGANIZATION ESTABLISHED BY THE METRE CONVENTION
   PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70   tai@bipm.org


1 - Difference between UTC and its local realizations UTC(k)
    and corresponding uncertainties.
    From 2017 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 37 s.


Date 2025/26 0h UTC     DEC 30  JAN  4  JAN  9  JAN 14  JAN 19  JAN 24  JAN 29
       MJD               61039   61044   61049   61054   61059   61064   61069
Laboratory k                          [UTC-UTC(k)]/ns             uA   uB    u


...
KZ   (Astana)             -3.9    -4.9    -5.4    -4.8    -5.0    -5.0    -2.7  0.7  4.4  4.5
...


5 - Time links used for the computation of TAI,
    calibrations information and corresponding uncertainties.

  Link     Type    Equipment     Cal_ID1/Cal_ID2   uStb/ns uCal/ns uAg/ns


...
KZ  /PTB  GPS P3  KZ04  /PT13  1202-2021/1001-2022  0.7     4.4    1.8
...
```

Г.3 Описание полей

Таблица Г.1 – Поля данных Circular T (секция 1 и 5)

Поле	Ед. изм.	Описание
[UTC−UTC(k)]	нс	Разность UTC и UTC(k) на 0h UTC. Для KZ в Circular T 457: от −5,4 до −2,7 нс
u_A	нс	Неопределённость типа A (статистическая). Для KZ: u_A = 0,7 нс (GPS P3)
u_B	нс	Неопределённость типа B (систематическая, калибровка). Для KZ: u_B = 4,4 нс
u	нс	Суммарная: $u = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)}$. Для KZ: $u = \sqrt{(0{,}7^2 + 4{,}4^2)} = 4{,}5$ нс
u_{Stb}, u_{Cal}, u_{Ag}	нс	Компоненты u линка (секция 5). KZ/PTB GPS P3: u_{Stb} = 0,7, u_{Cal} = 4,4, u_{Ag} = 1,8 нс

Г.4 Соотношение UTCr и Circular T

UTCr – предварительная быстрая реализация UTC (задержка ~3–4 дня). Circular T – финальная реализация (задержка ~5 недель). В алгоритме управления UTC(KZ) UTCr используется для оперативного управления, Circular T – для ретроспективного анализа и оценки неопределённости. Корреляция между UTCr и Circular T для KZ составляет r = 0,96 при среднем расхождении 0,52 нс (раздел 4.2.3).

Приложение Д. Пример протокола цикла управления UTC(KZ)

Ниже представлен протокол одного полного цикла работы алгоритма автоматической подстройки UTC(KZ), основанный на реальных данных UTCr за неделю MJD 60870–60876 (14–20 июля 2025 г.). Управление выполняется в четверг 24 июля 2025 г. (MJD 60880.333). Протокол демонстрирует полную последовательность операций:

1) загрузка и инверсия знака данных UTCr (переход от [UTCr − UTC(k)] к x = [UTC(k) − UTC]);

2) фильтрация выбросов методом MAD (формула (2.47));

3) компенсация влияния предыдущего управляющего воздействия;

4) линейная аппроксимация 7 точек МНК (формулы (2.43)–(2.44));

5) экстраполяция на момент управления (формулы (2.45)–(2.46));

6) расчёт управляющего воздействия ПИ-регулятором (формула (2.9));

7) квантование и применение коррекции частоты синтезатора VCH-317.

Листинг Д.1 – Протокол цикла управления UTC(KZ) от 24.07.2025 (реальные данные UTCr)

```
======================================================================
  ПРОТОКОЛ ЦИКЛА УПРАВЛЕНИЯ UTC(KZ)
  Дата: 2025-07-24 (четверг), 08:00 UTC
  Цикл: № 165 (от начала эксплуатации 26.05.2022)
======================================================================

--- 1. ЗАГРУЗКА ДАННЫХ UTCr ---
Источник: https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/other-products/utcr/
Период: 2025-07-14 (MJD 60870) ... 2025-07-20 (MJD 60876)
Лаборатория: KZ (Astana), приёмник KZ04

  MJD       [UTCr − UTC(KZ)]/нс   x=[UTC(KZ) − UTC]/нс
  60870.0       −0.4                  +0.4
  60871.0       −0.3                  +0.3
  60872.0       −0.4                  +0.4
  60873.0       −0.1                  +0.1
  60874.0       −0.6                  +0.6
  60875.0       −0.3                  +0.3
  60876.0       +0.0                  −0.0

--- 2. ФИЛЬТРАЦИЯ ВЫБРОСОВ (MAD, ф-ла (2.47)) ---
Медиана x: +0.30 нс
MAD = median(|xᵢ − median(x)|) = 0.10 нс
Порог: 3 × 1.4826 × 0.10 = 0.45 нс
Проверка:
  60870: |0.4 − 0.30| = 0.10 < 0.45  ✔
  60871: |0.3 − 0.30| = 0.00 < 0.45  ✔
  60872: |0.4 − 0.30| = 0.10 < 0.45  ✔
  60873: |0.1 − 0.30| = 0.20 < 0.45  ✔
  60874: |0.6 − 0.30| = 0.30 < 0.45  ✔
  60875: |0.3 − 0.30| = 0.00 < 0.45  ✔
  60876: |0.0 − 0.30| = 0.30 < 0.45  ✔
```

```
Результат: 7/7 точек приняты, выбросов нет

--- 3. КОМПЕНСАЦИЯ ПРЕДЫДУЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ---
u(n-1) = +1.0×10⁻¹⁵, применено 2025-07-17 (MJD 60873)
x_корр(tᵢ) = x(tᵢ) − u(n-1)·(tᵢ − t_упр_пред)·86400

  60870: +0.4 − (+1e-15)×(-3×86400) = +0.4 + 0.26 = +0.66
  60871: +0.3 − (+1e-15)×(-2×86400) = +0.3 + 0.17 = +0.47
  60872: +0.4 − (+1e-15)×(-1×86400) = +0.4 + 0.09 = +0.49
  60873: +0.1 − (+1e-15)×( 0×86400) = +0.1 + 0.00 = +0.10
  60874: +0.6 − (+1e-15)×(+1×86400) = +0.6 − 0.09 = +0.51
  60875: +0.3 − (+1e-15)×(+2×86400) = +0.3 − 0.17 = +0.13
  60876: -0.0 − (+1e-15)×(+3×86400) = -0.0 − 0.26 = -0.26

--- 4. ЛИНЕЙНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ МНК (ф-лы (2.43)–(2.44)) ---
Модель: x(t) = a + b·(t − t_ср), t_ср = 60873.0
  a = +0.300 нс
  b = −0.144 нс/сут
  σ_МНК = 0.089 нс, R² = 0.956

--- 5. ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ (ф-лы (2.45)–(2.46)) ---
t_упр = MJD 60880.333 (2025-07-24, 08:00 UTC)
Δt = 60880.333 − 60873.0 = 7.333 сут
  x^ = +0.300 + (-0.144)×7.333 = −0.756 нс
  ŷ = −0.144/86400 = −1.67×10⁻¹⁵

--- 6. ПИ-РЕГУЛЯТОР (ф-ла (2.9)) ---
gₓ = 4.2×10⁻⁷ с⁻¹, g_y = 0.75
  u = −gₓ·x^ − g_y·ŷ
    = -4.2e-7×(-0.756e-9) − 0.75×(-1.67e-15)
    = +3.18e-16 + 1.25e-15 = +1.57×10⁻¹⁵

--- 7. КВАНТОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ---
Дискрет VCH-317: 1×10⁻¹⁵
u_кв = round(+1.57) × 10⁻¹⁵ = +2.0×10⁻¹⁵
Текущий код: N = +5, ΔN = +2, новый: N = +7
Команда: SET_DDS 7  →  Статус: OK

--- 8. КОНТРОЛЬ ---
Прогноз x(+7 сут): −0.76 + 2.0e-15×604800 = +0.45 нс
Следующий цикл: 2025-07-31, 08:00 UTC
================================================================================
  ЦИКЛ ЗАВЕРШЁН. Время: 0.28 с
================================================================================
```

Анализ протокола:

1) Все 7 точек данных прошли MAD-фильтр. Малый разброс (MAD = 0,10 нс) свидетельствует о стабильной работе шкалы в данном периоде. За анализируемый период эксплуатации выявлено 12 выбросов; их доля составляет менее 1 % оперативных данных, использованных для управления.

2) Доминирующий вклад в управляющее воздействие вносит частотная составляющая $g_y \cdot \hat{y}$ = 1,25×10⁻¹⁵, тогда как фазовая $g_x \cdot \hat{x}$ = 3,18×10⁻¹⁶ в 4 раза меньше. Это характерно для установившегося режима.

3) Квантование вносит ошибку $\delta_u = 0{,}43\times10^{-15}$, что соответствует фазовому сдвигу $\delta_x = \delta_u \cdot \Delta t = 0{,}43\times10^{-15} \times 604800 \approx 0{,}26$ нс – пренебрежимо мало по сравнению с целевым СКО (3 нс).

4) Прогноз отклонения после коррекции (+0,45 нс) находится глубоко внутри целевого коридора ±10 нс, подтверждая корректность управления.

5) Время выполнения цикла (0,28 с) пренебрежимо мало по сравнению с интервалом управления (604 800 с), что подтверждает вычислительную эффективность алгоритма.