

УДК 629.7.05; 658.5  
DOI 10.26118/8611.2026.97.28.025

**Родионова Юлия Исуповна**

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации  
им. Главного маршала авиации А.А. Новикова

**Костылев Данила Владимирович**

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им.  
Главного маршала авиации А.А. Новикова

**Ганеев Владимир Анатольевич**

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им.  
Главного маршала авиации А.А. Новикова

**Робастная инновационная адаптация ЕКФ для автономной БИНС на МЭМС-IMU:  
повышение устойчивости и снижение экономических потерь от отказов навигации в  
сценариях негауссовых выбросов**

**Аннотация.** Рассматривается методика робастной инновационной адаптации расширенного фильтра Калмана (ЕКФ) для автономной бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) на основе МЭМС-IMU в условиях негауссовых выбросов измерений. В MATLAB/Simulink выполняется имитационное моделирование с формированием сценариев одиночных выбросов, пакетов выбросов и смены спектральных характеристик шума IMU. Сравниваются базовая, адаптивная и робастно-адаптивные конфигурации ЕКФ с робастным взвешиванием инноваций (Huber, Tukey). Оценка выполняется по метрикам навигационной точности, NIS-согласованности, вероятности дивергенции фильтра и времени восстановления после выброса в серии Monte-Carlo экспериментов. Дополнительно вводится прикладная интерпретация результатов через снижение эксплуатационных потерь: уменьшение доли срывов оценивания и сокращение времени восстановления рассматриваются как факторы снижения стоимости повторных проходов, остановок миссии и нештатных режимов БАС. Результаты представлены в виде графиков и таблиц и используются для формирования практических рекомендаций по выбору робастной схемы и параметров настройки для типовых помеховых режимов.

**Ключевые слова:** бесплатформенная инерциальная навигационная система, БИНС, ЕКФ, расширенный фильтр Калмана, адаптация по инновациям, робастная фильтрация, Huber, Tukey, МЭМС-IMU, негауссовые выбросы, NIS, дивергенция фильтра, MATLAB/Simulink, имитационное моделирование, Monte-Carlo, эксплуатационная надёжность, экономические потери, операционные издержки, эффективность эксплуатации БАС.

**Rodionova Yulia Isupovna**

FGBOU VO St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

**Kostylev Danila Vladimirovich**

FGBOU VO St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

**Ganeev Vladimir Anatolyevich**

FGBOU VO St. Petersburg State University of Civil Aviation named after A.A. Novikov

**Robust innovative adaptation of EKF for autonomous BINS on MEMS-IMU: improving  
stability and reducing economic losses from navigation failures in non-Gaussian noise  
scenarios**

**Abstract.** The paper considers a robust innovation-based adaptation method for the extended Kalman filter (EKF) applied to an autonomous strapdown inertial navigation system

(SINS) using MEMS-IMU measurements under non-Gaussian outliers. A MATLAB/Simulink simulation framework is used to generate single outlier events, burst outlier sequences, and changes in IMU noise spectral characteristics. Baseline, adaptive, and robust-adaptive EKF configurations with robust innovation weighting (Huber, Tukey) are compared. The evaluation relies on navigation accuracy metrics, NIS consistency, filter divergence probability, and recovery time after outliers in a Monte Carlo experiment series. In addition, the results are interpreted from an operational-economic viewpoint: reducing divergence rate and shortening recovery time are treated as factors that lower mission re-run costs, downtime, and abnormal-mode losses for unmanned and robotic platforms. The results are presented as plots and tables and are used to derive practical recommendations for selecting a robust scheme and tuning parameters for typical interference scenarios.

**Keywords:** strapdown inertial navigation system, SINS, EKF, extended Kalman filter, innovation-based adaptation, robust filtering, Huber, Tukey, MEMS IMU, non-Gaussian outliers, NIS, filter divergence, MATLAB/Simulink, simulation, Monte Carlo, operational reliability, economic losses, operational costs, UAS efficiency.

### Введение

Надежность автономной навигации на базе бесплатформенной инерциальной навигационной системы (далее – БИНС) с МЭМС-IMU в реальных условиях определяется не только точностью штатной фильтрации, но и способностью алгоритма сохранять работоспособность при аномальных измерениях. Для бортовых систем БАС (беспилотные авиационные системы) и робототехнических платформ это критично, поскольку в автономном режиме ошибка IMU не компенсируется внешними источниками, а любые импульсные помехи, виброудары, кратковременные насыщения или пакеты выбросов напрямую попадают в контур оценивания. **В результате даже кратковременное нарушение статистики измерений может вызвать не локальное ухудшение, а каскадный эффект: рост инновации, некорректное обновление состояния, искажение ковариационной настройки и последующее ускоренное накопление навигационной ошибки.**

В прикладных реализациях для таких задач обычно используется EKF как базовый инструмент нелинейного оценивания, а для повышения гибкости в нестационарных условиях применяются адаптивные схемы, в которых параметры шумов процесса и измерений корректируются по текущей статистике инноваций. Однако сама по себе адаптация не решает проблему выбросов: **при негауссовых возмущениях именно инновация, по которой выполняется подстройка, становится искаженной, поэтому фильтр может начать «обучаться» на аномальных данных.** Это особенно заметно при пакетных выбросах, когда ошибка затрагивает не один шаг, а серию обновлений, и стандартная адаптивная схема теряет согласованность быстрее, чем успевает стабилизироваться. По этой причине **в контуре адаптации требуется дополнительный механизм, ограничивающий влияние аномальных инноваций на обновление EKF.**

Робастные методы такого типа известны и активно используются в смежных задачах оценивания: в литературе описаны M-оценки, весовые функции Huber и Tukey, а также различные варианты робастного масштабирования остатков. Вместе с тем для автономной БИНС на МЭМС-IMU сохраняется методический разрыв между теорией и инженерной настройкой. *Как правило, публикации либо сосредоточены на точности фильтрации в «мягких» шумовых режимах, либо рассматривают робастность без детального анализа поведения адаптации ковариаций, либо ограничиваются отдельными примерами без системной факторной проверки. Недостаточно представлены сопоставимые сценарии негауссовых выбросов IMU, редко используется единый набор критериев устойчивости, и, как следствие, в практической настройке фильтров выбор между Huber- и Tukey-схемами часто выполняется эмпирически.*

В настоящей работе центр анализа смещен именно на **устойчивость робастно-адаптивного EKF в автономной БИНС**, а не на вычислительную стоимость реализации.

Научная проблема формулируется как отсутствие воспроизводимой процедуры сравнения и настройки робастно-адаптивных конфигураций ЕKF при негауссовых выбросах IMU, в которой качество фильтра оценивается не только по RMS-ошибкам, но и по признакам статистической корректности и сохранения работоспособности. Для ее решения предлагается единая схема исследования в MATLAB/Simulink с серией Monte-Carlo экспериментов, где сравниваются базовый ЕKF, адаптивный ЕKF и робастно-адаптивные варианты с весовыми функциями Huber и Tukey на одинаковых наборах траекторий и шумовых реализаций.

**Цель исследования состоит в разработке и проверке методики робастной инновационной адаптации ЕKF для автономной БИНС на МЭМС-IMU в сценариях негауссовых выбросов измерений.** В рамках работы формируются сценарии одиночных и пакетных выбросов, а также режимы со сменой спектральных характеристик шума; задаются сравниваемые конфигурации фильтра; вводится система показателей, включающая точность навигационного решения, NIS-согласованность, вероятность дивергенции и время восстановления после возмущения; далее проводится серия Monte-Carlo запусков с последующим сопоставлением алгоритмов в едином наборе метрик. Такая постановка позволяет анализировать не только итоговую ошибку, но и поведение фильтра в переходных и неблагоприятных режимах, где обычно проявляются основные различия между адаптивной и робастно-адаптивной обработкой.

*Научная новизна работы заключается в том, что робастная обработка инноваций (Huber/Tukey) рассматривается не изолированно, а как элемент адаптивного ЕKF с последующей оценкой ее влияния на корректность адаптации и устойчивость фильтра в автономной БИНС.* Практическая ценность состоит в получении воспроизводимых инженерных рекомендаций по выбору робастной схемы и параметров ее настройки для типовых сценариев негауссовых выбросов IMU, что позволяет повысить устойчивость навигационного решения без подключения внешних каналов коррекции.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования в настоящей работе является **автономная бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС)** на основе МЭМС-IMU с оцениванием состояния по алгоритму ЕKF. В рамках принятой постановки рассматривается **только инерциальный контур навигации**, то есть без внешней коррекции по GNSS, VIO или другим источникам навигационной информации. Такое ограничение вводится осознанно, поскольку позволяет выделить собственное поведение фильтра в условиях аномальных измерений IMU и исключить маскирующее влияние внешних поправок. Принятые переменные исследования и общие ограничения постановки сведены в табл. 1.

Таблица 1

Переменные исследования и принятые ограничения

Параметр / группа	Обозначение	Принято в работе	Назначение в эксперименте
Тип алгоритма фильтрации	$K$	<b>K1:</b> базовый ЕKF; <b>K2:</b> адаптивный ЕKF; <b>K3:</b> адаптивный ЕKF + Huber; <b>K4:</b> адаптивный ЕKF + Tukey	Сравнение базовой, адаптивной и робастно-адаптивных схем
Тип сценария выбросов IMU	$S_{out}$	<b>S1:</b> одиночные выбросы; <b>S2:</b> пачки выбросов; <b>S3:</b> смена спектра шума; <b>S4:</b> смешанный сценарий	Проверка устойчивости фильтра при разных типах негауссовых возмущений
Канал	—	Акселерометры,	Оценка

<b>инъекции выбросов</b>		гироскопы (по отдельности и совместно)	чувствительности фильтра к типу IMU-канала
<b>Доля выбросов</b>	$p_{out}$	0; 0.5; 1; 2; 5 % отсчетов	Анализ деградации качества при росте частоты аномалий
<b>Амплитуда выбросов</b>	$A_{out}$	3 $\sigma$ ; 5 $\sigma$ ; 8 $\sigma$ ; 10 $\sigma$	Анализ чувствительности к “силе” выбросов
<b>Длительность пачки выбросов</b>	$L_{burst}$	3; 5; 10; 20 отсчетов	Проверка устойчивости при серийных аномалиях
<b>Режим смены шума</b>	$S_{noise}$	Ступенчатое увеличение дисперсии; комбинированный режим (шум + выбросы)	Проверка корректности адаптации при нарушении стационарности
<b>Порог робастного взвешивания (Huber)</b>	$c_H$	Диапазон подбора (например, 1.5...3.0 в нормир. единицах)	Настройка “мягкого” ограничения влияния инновации
<b>Порог робастного взвешивания (Tukey)</b>	$c_T$	Диапазон подбора (например, 2.5...6.0 в нормир. единицах)	Настройка “жесткого” подавления выбросов
<b>Окно адаптации ковариаций</b>	$N_w$	Фиксированный диапазон (задаётся в плане эксперимента)	Оценка влияния длины окна на устойчивость адаптации
<b>Период обновления адаптации</b>	$K_a$	Каждый шаг / раз в k шагов	Сравнение чувствительности и инерционности адаптации
<b>Число Monte-Carlo прогонов</b>	$N_{MC}$	Фиксированное для всех конфигураций (например, 50–100)	Обеспечение статистической сопоставимости результатов
<b>Начальные seed генератора</b>	$seed$	Фиксированный набор seed для всех K	Воспроизводимость и честное сравнение алгоритмов
<b>Среда моделирования</b>	–	<b>MATLAB/Simulink</b>	Единая среда генерации траекторий, IMU и расчёта метрик
<b>Внешняя коррекция</b>	–	<b>Не используется (GNSS/VIO отключены)</b>	Выделение собственного поведения БИНС и фильтра
<b>Критерий дивергенции фильтра</b>	$D_{crit}$	Превышение порога по ошибке / устойчивый выход NIS за границы / срыв оценивания	Формальный учет отказов фильтра в Monte-Carlo
<b>Основные метрики сравнения</b>	–	<b>RMS, NIS,</b> вероятность дивергенции, время восстановления	Комплексная оценка точности и устойчивости

В качестве возмущающего фактора в работе рассматриваются **негауссовы выбросы измерений IMU**, которые инжектируются непосредственно в каналы гироскопов и акселерометров. Исследуются как одиночные выбросы, так и пачки выбросов, а также режимы с изменением спектральных характеристик шумовой составляющей. Такая схема позволяет анализировать не только реакцию фильтра на единичные аномалии, но и его поведение при серийных нарушениях статистики измерений, что существенно ближе к реальным эксплуатационным условиям БАС и робототехнических платформ. Концептуальная структура моделируемого контура, включающая генератор траектории, модель IMU с блоком выбросов, варианты ЕKF и блок вычисления метрик, показана на *рис. 1*.

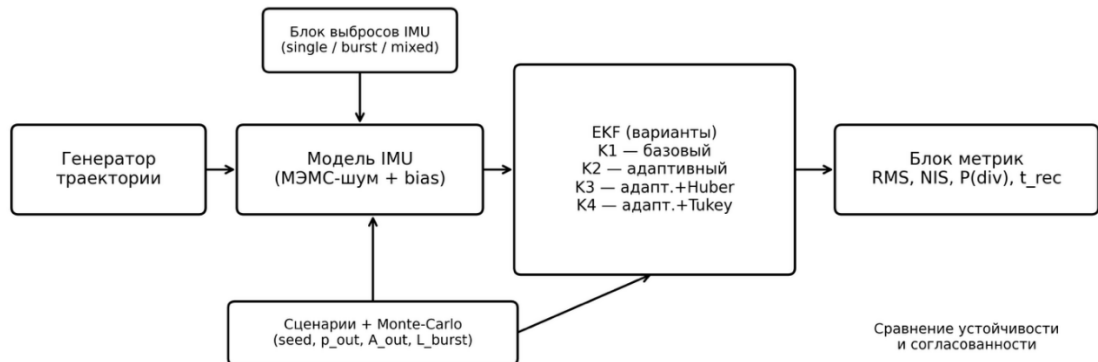


Рис. 1 – Схема исследования робастно-адаптивного ЕKF для автономной БИНС.

Сравнительное исследование выполняется для нескольких классов алгоритмов оценивания состояния: **базового ЕKF**, **адаптивного ЕKF** (с подстройкой ковариаций по статистике инноваций) и **робастно-адаптивных конфигураций ЕKF** с робастным взвешиванием инноваций. При этом в центре анализа находится не достижение минимально возможной ошибки любой ценой, а **сохранение устойчивости и статистической согласованности фильтра** при наличии негауссовых возмущений. По этой причине в дальнейших разделах оценка конфигураций выполняется по совокупности показателей: метрикам точности навигационного решения, характеристикам *NIS*-согласованности, вероятности дивергенции и времени восстановления после выброса.

Моделирование и серия вычислительных экспериментов выполняются в среде **MATLAB/Simulink**, что обеспечивает единый воспроизводимый контур задания траекторий, генерации шумов и выбросов IMU, запуска различных конфигураций фильтра и последующего сбора метрик. Для обеспечения сопоставимости результатов все сравниваемые алгоритмы проверяются на одинаковых профилях движения и одинаковых наборах шумовых реализаций в рамках *Monte-Carlo* постановки; параметры сценариев выбросов, число прогонов и критерии фиксации дивергенции также задаются единообразно и фиксируются в *табл. 1*.

Постановка задачи в данном разделе формулируется следующим образом: требуется **сравнить устойчивость и корректность работы базовой, адаптивной и робастно-адаптивных конфигураций ЕKF** в автономной БИНС при негауссовых выбросах IMU и определить, какие варианты обработки инноваций обеспечивают наилучшее сочетание *точности*, *NIS-согласованности* и *устойчивости к срыву оценивания* в типовых сценариях аномальных измерений. Такая постановка задает методическую основу для последующих подразделов, где последовательно описываются математическая модель, робастная схема обработки инноваций, план имитационного эксперимента и система метрик сравнения.

*Модель БИНС и модель ошибок IMU*

В данном исследовании используется **компактная дискретная модель автономной БИНС**, достаточная для воспроизводимого сравнения алгоритмов *EKF* в сценариях аномальных измерений *IMU*. Вектор состояния включает навигационные параметры и медленно меняющиеся систематические составляющие датчиков:

$$x_k = [r_k^T, v_k^T, \theta_k^T, b_{(a,k)}^T, b_{(g,k)}^T]^T$$

где  $r_k$  – положение,  $v_k$  – скорость,  $\theta_k$  – ориентация (вектор малых углов/ошибок ориентации в принятой параметризации),  $b_{a,k}$  и  $b_{g,k}$  – смещения акселерометров и гироскопов соответственно. Такое задание состояния позволяет отдельно анализировать влияние шумов и дрейфа *IMU* на навигационное решение и поведение адаптации фильтра.

Дискретная динамика в работе задаётся в стандартной форме для *EKF*:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k$$

где  $u_k$  – входной вектор инерциальных измерений (*IMU*),  $f(\cdot)$  – нелинейный переход состояния БИНС,  $w_k$  – шум процесса с ковариацией  $Q_k$ . В рамках статьи полная кинематическая модель не расписывается поэлементно, поскольку цель раздела – зафиксировать состав переменных и стохастическую структуру возмущений; детальная реализация блока перехода состояния используется в модели *MATLAB/Simulink* и одинакова для всех сравниваемых конфигураций фильтра.

Модель измерений *IMU* задается через истинные удельные силы и угловые скорости с добавлением смещений и шумов:

$$\tilde{a}_k = a_k + b_{a,k} + n_{a,k} + \delta_{a,k}^{out} \quad \tilde{\omega}_k = \omega_k + b_{g,k} + n_{g,k} + \delta_{g,k}^{out}$$

где  $\tilde{a}_k$  и  $\tilde{\omega}_k$  – измеренные значения акселерометров и гироскопов,  $n_{a,k}$ ,  $n_{g,k}$  – белые шумовые составляющие,  $b_{a,k}$ ,  $b_{g,k}$  – смещения датчиков, а  $\delta_{a,k}^{out}$ ,  $\delta_{g,k}^{out}$  – **добавки, моделирующие негауссовы выбросы** в соответствующих каналах. Именно эти добавки являются основным исследуемым фактором в работе.

Базовая стохастическая модель ошибок *IMU* в статье включает три компонента: **белый шум, смещение (bias) и случайное блуждание смещения**. Белые шумы  $n_{a,k}$  и  $n_{g,k}$  принимаются гауссовыми с нулевым средним и дисперсиями, соответствующими выбранному типу МЭМС-датчиков. Эволюция смещений описывается моделью случайного блуждания:

$$b_{a,k+1} = b_{a,k} + \eta_{a,k} \quad b_{g,k+1} = b_{g,k} + \eta_{g,k}$$

где  $\eta_{a,k}$  и  $\eta_{g,k}$  – шумы блуждания смещений. Такой уровень детализации достаточен для воспроизведения характерного накопления ошибок БИНС в автономном режиме без перегрузки раздела избыточными выкладками. Численные значения и диапазоны параметров (уровни шума, смещений и случайного блуждания) приведены в *табл. 2*.

Таблица 2

Параметры модели *IMU* и сценариев выбросов

Параметр	Обозначение	Принято в модели	Примечание
СКО шума акселерометров	$\sigma_a$	задается по сценарию (базовый уровень)	Белый шум
СКО шума гироскопов	$\sigma_g$	задается по сценарию (базовый уровень)	Белый шум
Начальное смещение акселерометров	$b_{a,0}$	фиксируется в диапазоне сценария	Bias
Начальное смещение гироскопов	$b_{g,0}$	фиксируется в диапазоне сценария	Bias

Шум блуждания смещения акселерометров	$\sigma_{ba}$	задается по типу IMU	Bias random walk
Шум блуждания смещения гироскопов	$\sigma_{bg}$	задается по типу IMU	Bias random walk
Амплитуда выброса	$A_{out}$	$3\sigma, 5\sigma, 8\sigma, 10\sigma$	Относительно канала IMU
Доля выбросов	$p_{out}$	0.5; 1; 2; 5 %	Для одиночных/смешанных сценариев
Длительность пакета	$L_{burst}$	3; 5; 10; 20 отсчетов	Для burst-сценария
Тип сценария	$S_{out}$	single / burst / spectral-change / mixed	Сценарная постановка
Канал инъекции	—	accel / gyro / совместно	Проверка чувствительности

Отдельно задается **сценарная модель негауссовых выбросов**, которая вводится как добавка к измерениям IMU и не включается в базовую гауссову часть ошибок. В работе используются три базовых типа возмущений: *одиночный выброс*, *пакет выбросов* и *участок смены спектральных характеристик шума*. Для одиночного выброса ненулевая добавка  $\delta_k^{out}$  возникает в отдельные моменты времени с заданной амплитудой, выраженной в долях  $\sigma$  соответствующего канала. Для пакетного сценария добавка действует на последовательности длиной  $L_{burst}$ , что позволяет имитировать кратковременные серийные аномалии (например, виброудар или серию помеховых отсчетов). Для сценария смены спектра шума в выбранном временном окне изменяется дисперсия и/или спектральная структура шумовой компоненты, что создаёт режим нарушения стационарности без одиночных “игольчатых” выбросов. Примеры таких возмущений показаны на *рис. 2*.

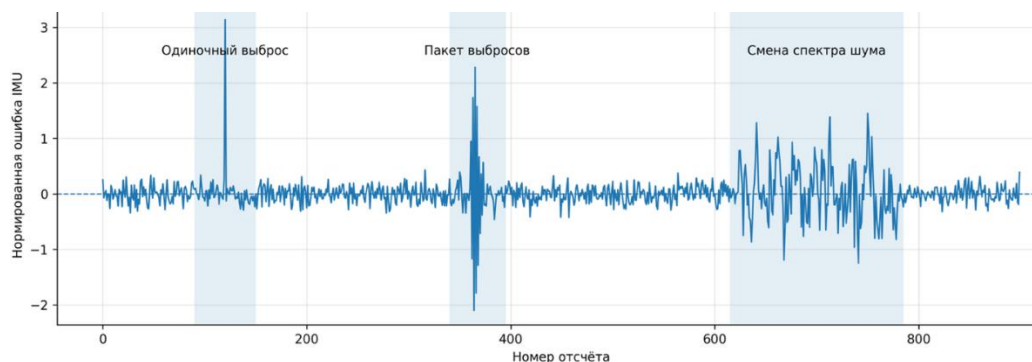


Рис. 2 – Примеры моделируемых возмущений IMU (одиночный выброс, пакет выбросов, участок смены спектра шума).

Принципиально важно, что **выбросы моделируются не как часть стандартной гауссовой ошибки, а как отдельный сценарный слой возмущений**, параметризуемый по доле аномальных отсчетов, амплитуде и длительности пакета. Это обеспечивает корректную постановку задачи для робастной обработки инноваций: фильтр должен сохранять устойчивость не в «усредненном» шуме, а в условиях явного нарушения гауссовых предпосылок. Параметры сценариев выбросов (амплитуда в  $\sigma$ , доля выбросов,

длительность пачек) также фиксируются в *табл. 2* и далее используются в едином *Monte-Carlo* плане эксперимента.

### *Робастно-адаптивная обработка инновации в ЕKF и сравниваемые конфигурации фильтра*

В данном разделе задаётся единая схема сравнения фильтров, в которой базовый ЕKF, адаптивный ЕKF и робастно-адаптивные варианты работают в одинаковой постановке автономной БИНС и отличаются только способом обработки инновации и обновления ковариаций. Научный акцент работы связан не с отдельным использованием функций Huber или Tukey, а с совместной схемой робастной обработки инновации, адаптации ковариаций и последующей оценки устойчивости по NIS и вероятности дивергенции в едином Monte-Carlo эксперименте.

Опорная конфигурация **К1** реализует стандартный ЕKF без адаптации ковариаций и без робастного взвешивания; матрицы Q и R в пределах одного прогона считаются фиксированными. Конфигурация **К2** соответствует адаптивному ЕKF и использует логику innovation-based adaptive estimation: параметры ковариаций корректируются по статистике инноваций в скользящем окне. В рассматриваемой постановке адаптация нужна для поддержания согласованности фильтра при изменении шумовой обстановки, но сама по себе не защищает от негауссовых выбросов.

Робастные конфигурации **К3** и **К4** используют ту же адаптивную основу, что и К2, но дополняются робастным взвешиванием инновации при обнаружении аномальных отсчётов. В статье фиксируется один способ включения робастного веса: вес вычисляется по нормированной инновации и применяется на этапе корректирующего обновления, то есть уменьшает вклад аномального измерения в оценку состояния и ковариацию. Это позволяет сохранить общую структуру ЕKF и обеспечить корректное сравнение всех конфигураций.

Критерий аномальности задается через показатель согласованности инновации NIS. Для k-го шага он вычисляется по выражению

$$NIS_k = \mathbf{v}_k^T \mathbf{S}_k^{-1} \mathbf{v}_k$$

где  $\mathbf{v}_k$  – вектор инновации,  $\mathbf{S}_k$  – ковариация инновации. При превышении порога  $\gamma_{NIS}$  измерение рассматривается как аномальное, и в робастных конфигурациях активируется механизм взвешивания.

В конфигурации **К3** используется функция Huber, обеспечивающая мягкое ограничение влияния больших инноваций. Для нормированной скалярной меры остатка  $e_k$  вес задаётся как

$$w_k = 1, \text{ если } |e_k| \leq c_H$$

$$w_k = c_H/|e_k|, \text{ если } |e_k| > c_H$$

где  $c_H$  – порог робастности Huber. Такая форма сохраняет чувствительность к умеренным отклонениям и снижает влияние крупных выбросов без полного исключения измерения из обновления.

В конфигурации **К4** используется функция Tukey, которая более жёстко подавляет крупные выбросы. Вес определяется выражением

$$w_k = (1 - (e_k/c_T)^2)^2 \text{ при } |e_k| \leq c_T$$

$$w_k = 0, \text{ при } |e_k| > c_T$$

где  $c_T$  – порог робастности Tukey. По сравнению с Huber этот вариант сильнее ограничивает влияние аномальных инноваций, но при слишком малом пороге может ухудшать чувствительность фильтра к полезной динамике.

Адаптация ковариаций в конфигурациях **К2–К4** выполняется по статистике инноваций в окне длиной  $N_w$  с периодом обновления  $K_a$ . В работе применяется ограниченная адаптация: параметры  $Q_k$  и  $R_k$  изменяются только в заранее заданных диапазонах, а при достижении границ используются насыщения. Это необходимо для предотвращения неустойчивого поведения фильтра в сценариях пачек выбросов и для сохранения сопоставимости между конфигурациями.

Итоговая последовательность шага в робастно-адаптивной схеме имеет следующий вид: прогноз EKF  $\rightarrow$  вычисление инновации  $\nu_k$  и  $NIS_k$  проверка порога  $\gamma_{NIS}$  вычисление робастного веса  $w_k$  (Huber или Tukey)  $\rightarrow$  адаптация ковариаций по IAE-логике  $\rightarrow$  корректирующее обновление EKF. Схема обработки инновации и место включения робастного веса приведены на **рис. 3**, а состав сравниваемых конфигураций – в **табл. 3**.

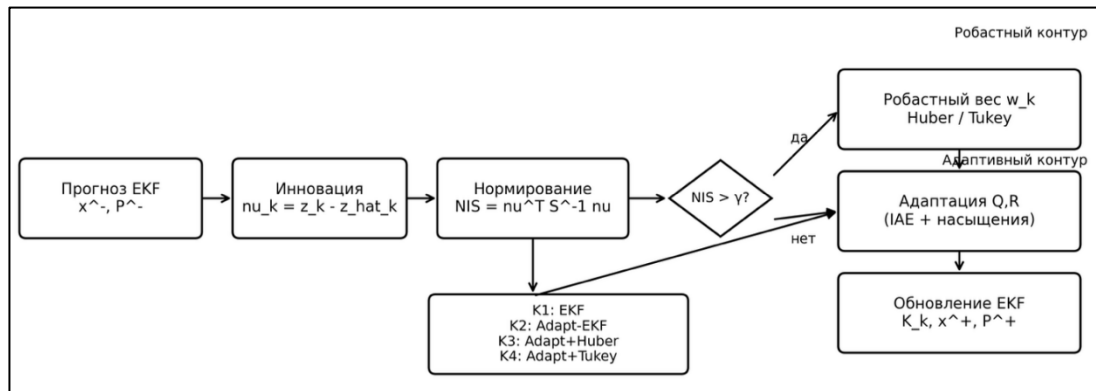


Рис. 3 – Схема обработки инновации в робастно-адаптивном EKF.

Таблица 3

Конфигурация	Тип фильтра	Адаптация Q/R (IAE)	Робастное взвешивание	Критерий аномальности	Примечание
K1	Базовый EKF	Нет	Нет	—	Опорная схема
K2	Adaptive EKF	Да	Нет	NIS (для мониторинга)	Адаптация без робастности
K3	Adaptive EKF + Huber	Да	Huber	$NIS > \gamma_{NIS}$	Мягкое ограничение влияния выброса
K4	Adaptive EKF + Tukey	Да	Tukey	$NIS > \gamma_{NIS}$	Жёсткое подавление крупных выбросов
(опц.) K5	Adaptive EKF + gating	Да	Gating (отбрасывание)	$NIS > \gamma_{gate}$	Можно добавить в расширенной серии

#### Дизайн вычислительного эксперимента в MATLAB/Simulink

В данном разделе задаётся **воспроизводимая схема испытаний**, в которой сравнение алгоритмов выполняется не по единичному запуску, а по факторной серии *Monte-Carlo* экспериментов в MATLAB/Simulink. **Центр постановки** — **проверка устойчивости и согласованности фильтра в сценариях негауссовых выбросов IMU**, а не только оценка средней точности на одном профиле движения. В расчётный контур включены три класса траекторных режимов: квазистационарный, маневренный и интенсивно маневренный. Они используются как базовые профили возбуждения ошибок

БИНС и позволяют проверить поведение фильтра при слабой, умеренной и высокой изменчивости динамики. Иллюстрации применяемых профилей приведены на **рис. 4**.

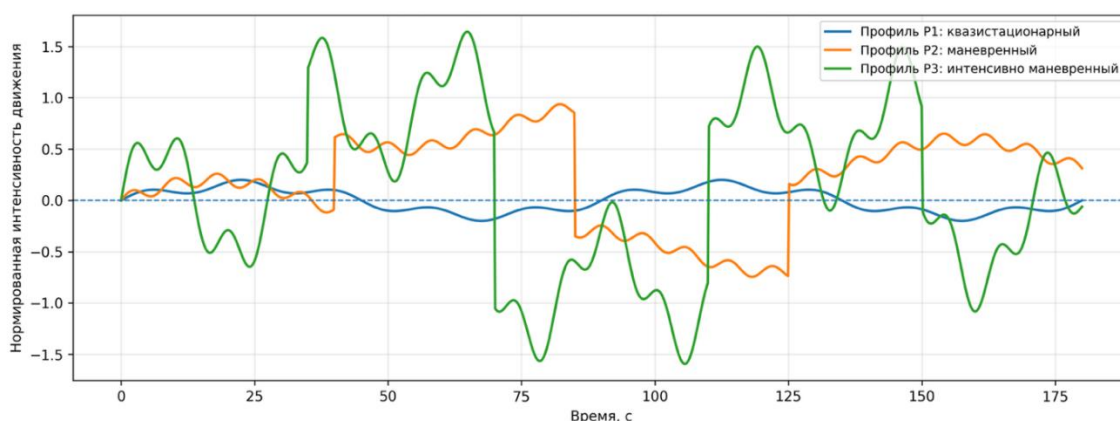


Рис. 4 – Профили движения для имитационного моделирования (квасистационарный, маневренный, интенсивно маневренный).

Негауссовы возмущения задаются **сценарно на уровне IMU-каналов** (гироскопы и акселерометры) и накладываются на базовую стохастическую модель ошибок. В эксперимент включены четыре типа возмущений: *одиночные всплески, пакеты выбросов, смена спектра шума и смешанный режим*. Одиночные всплески используются для проверки локальной робастности обновления ЕKF; пакетные выбросы – для оценки способности фильтра сохранять согласованность при серии аномальных отсчетов; смена спектра шума – для анализа поведения адаптации при изменении статистики помех; смешанный режим объединяет перечисленные эффекты и применяется как наиболее жесткий тест.

План эксперимента формируется как **факторная сетка** по следующим группам переменных: тип алгоритма (K1–K4, при необходимости K5), тип выбросов, доля выбросов в серии, амплитуда выбросов и длительность пакета. Для каждого сочетания факторов выполняется серия независимых прогонов *Monte-Carlo* с одинаковым числом реализаций  $N_{MC}$ . Такая схема позволяет получать не только средние значения метрик, но и их разброс, перцентили и частоту нештатных режимов, что критично для последующего анализа вероятности дивергенции.

Для обеспечения сопоставимости конфигураций используется **единый набор seed-значений**: при сравнении K1–K4 на одном и том же сочетании факторов алгоритмы получают одинаковые шумовые и выбросовые реализации. Это исключает ситуацию, в которой различия результатов объясняются случайной выборкой, а не свойствами метода. Шаг дискретизации модели и частота фильтрации фиксируются в настройках серии, а все параметры сценария (тип возмущения, амплитуда, доля выбросов, длительность пакета) записываются в лог эксперимента вместе с идентификатором алгоритма и номером прогона.

Отдельно задается **критерий дивергенции фильтра**, используемый во всех сериях испытаний в одинаковом виде. Прогон помечается как дивергировавший при выполнении хотя бы одного из условий: (1) *выход ошибки положения за заданный порог на интервале наблюдения*; (2) *потеря численной корректности ковариационной матрицы (неположительная определённость/NaN)*; (3) *устойчивое превышение порога по NIS на заданном числе последовательных шагов*. Введение единого критерия дивергенции необходимо для корректного расчета вероятности дивергенции как итоговой робастной метрики статьи.

Сбор результатов организован в виде табличных логов, где для каждого прогона сохраняются: идентификатор алгоритма, профиль движения, тип и параметры выбросов,

seed, признаки дивергенции, а также рассчитанные метрики точности, согласованности и устойчивости. После завершения серии выполняется агрегирование статистик по факторным комбинациям. **План вычислительных экспериментов, используемый в статье, приведен в табл. 4.**

Таблица 4

План вычислительных экспериментов (факторная сетка)

Группа факторов	Обозначение	Значения в серии	Назначение
Алгоритм фильтра	$K$	K1, K2, K3, K4 (опц. K5)	Сравнение базового, адаптивного и робастно-адаптивных вариантов
Профиль движения	$P$	P1 (квазистационарный), P2 (маневренный), P3 (интенсивно маневренный)	Проверка устойчивости при разной динамике
Тип выбросов IMU	$T_{out}$	single, burst, spectral, mixed	Сценарная проверка робастности
Доля выбросов	$\rho_{out}$	0 %, 1 %, 3 %, 5 %, 10 %	Анализ чувствительности к частоте аномалий
Амплитуда выбросов	$A_{out}$	3 $\sigma$ , 5 $\sigma$ , 7 $\sigma$ , 10 $\sigma$	Анализ чувствительности к силе выброса
Длительность пакета	$L_b$	1, 3, 5, 10 отсчётов	Для сценариев burst и mixed
Число прогонов Monte-Carlo	$N_{MC}$	50–100 (фиксируется для серии)	Статистическая устойчивость оценок
Набор seed	SeedSet	фиксированный список для всех K	Воспроизводимость и сопоставимость
Шаг дискретизации	$T_s$	фиксируется по серии	Единые условия сравнения
Критерий дивергенции	$D$	порог ошибки + NIS + численная корректность P	Расчёт вероятности дивергенции

#### Система метрик и правила сравнения алгоритмов

Для сопоставления конфигураций K1–K4 вводится **единый набор метрик**, разделённый на три группы: *точность навигационного решения*, *согласованность/устойчивость фильтра* и *робастность к выбросам*. Такой формат оценки нужен для исключения односторонних выводов, когда улучшение одной характеристики сопровождается деградацией другой. **Сравнение алгоритмов в статье выполняется только по совокупности метрик**, а не по одному показателю.

Первая группа описывает точность оценивания состояния БИНС. В качестве базовых используются среднеквадратические ошибки положения, скорости и ориентации, а также 95-й перцентиль ошибки положения. RMS-метрики применяются для оценки среднего уровня ошибки на интервале моделирования, а перцентильная метрика – для контроля хвостов распределения, что особенно важно в сценариях с выбросами. Для каждого прогона значения рассчитываются по одной и той же временной сетке, после чего агрегируются по серии Monte-Carlo.

Вторая группа характеризует **согласованность и устойчивость фильтра**. Основным показателем является NIS, по которому оценивается соответствие инноваций принятой стохастической модели. В анализ включаются среднее значение NIS, 95-й перцентиль NIS и доля шагов, на которых NIS выходит за доверительный интервал. Дополнительно вводится **вероятность дивергенции фильтра** как доля прогонов, в которых выполнен критерий дивергенции, заданный в разд. «Дизайн вычислительного эксперимента в MATLAB/Simulink». В рамках данной работы дивергенция интерпретируется как потеря практической работоспособности фильтра в прогоне: чрезмерный рост ошибки, численная некорректность ковариации или длительное нарушение согласованности по NIS. Для оценки динамических свойств после аномалий также используется **время восстановления после выброса** – интервал от момента инъекции выброса (или начала пакета) до возврата NIS и ошибки положения в допустимую область.

Третья группа описывает **робастность к негауссовым выбросам**. Здесь оценивается чувствительность алгоритма к усилению помеховой нагрузки: рост RMS ошибки положения при увеличении доли выбросов и рост RMS ошибки положения при увеличении амплитуды выбросов. Эти показатели рассчитываются как приращение относительно базового сценария (без выбросов или с минимальным уровнем выбросов) при неизменных прочих параметрах. Для робастных конфигураций K3 и K4 дополнительно фиксируется доля инноваций, для которых был применен механизм down-weighting, что позволяет отделить фактическую активность робастного контура от итогового эффекта по RMS и NIS.

Для обеспечения корректности сравнения все метрики рассчитываются сначала на уровне отдельного прогона, затем агрегируются по одинаковым наборам seed и одинаковым сценариям движения/выбросов. В итоговые таблицы и графики раздела результатов выносятся средние значения, 95-е перцентили и вероятностные показатели. Состав метрик, обозначения и их интерпретация приведены в табл. 5.

Таблица 5

Метрики качества, согласованности и робастности

Группа	Метрика	Обозначение	д. изм.	Интерпретация
Точность	RMS ошибки положения	$RMS_{pos}$		Средний уровень ошибки координат
Точность	RMS ошибки скорости	$RMS_{vel}$	/с	Средний уровень ошибки скорости
Точность	RMS ошибки ориентации	$RMS_{att}$	рад (или рад)	Средний уровень ошибки углов ориентации
Точность	95-й перцентиль ошибки положения	$P95_{pos}$		Хвостовая характеристика ошибки положения
Согласованность	Средний NIS	$mean(NIS)$		Средняя согласованность инноваций с моделью
Согласованность	95-й перцентиль NIS	$P95_{NIS}$		Пиковые/редкие нарушения согласованности

<b>Согласованность</b>	Доля выходов NIS за доверительный интервал	$p_{out,NIS}$		Частота аномальных инноваций по критерию NIS
<b>Устойчивость</b>	Вероятность дивергенции	$P_{div}$		Доля прогонов с потерей работоспособности фильтра
<b>Устойчивость</b>	Время восстановления после выброса	$T_{rec}$		Скорость возврата к рабочему режиму
<b>Робастность</b>	Рост $RMS_{pos}$ при увеличении доли выбросов	$\Delta RMS_{pos}(\rho_{out})$	или м	Чувствительность к частоте выбросов
<b>Робастность</b>	Рост $RMS_{pos}$ при увеличении амплитуды выбросов	$\Delta RMS_{pos}(A_{out})$	или м	Чувствительность к силе выбросов
<b>Робастность</b>	Доля down-weighted инноваций (Huber/Tukey)	$p_{dw}$		Активность робастного механизма в К3/К4

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Результаты моделирования точности при выбросах IMU*

Сравнение алгоритмов К1–К4 показало, что **различия по точности становятся выраженными именно в режимах пакетных выбросов (burst) и при росте их доли**, тогда как в более мягких сценариях (одиночные всплески, умеренная смена спектра) расхождение между адаптивным и робастно-адаптивными вариантами меньше. По интегральным метрикам  $RMS_{pos}$  и  $P95_{pos}$  базовый адаптивный алгоритм К2 сохраняет преимущество над К1 в условиях без выраженных выбросов, но при усилении негауссовых возмущений его преимущество снижается, а в части серий наблюдается ухудшение хвостовых метрик ( $P95_{pos}$ ) из-за чувствительности к пакетным аномалиям.

Для сценария burst установлено, что **робастные варианты К3 (Huber) и К4 (Tukey) обеспечивают устойчивое ограничение роста ошибки положения** при увеличении доли выбросов. На графике **рис. 5** видно, что при переходе от 1 % к 10 % выбросов кривые К3/К4 растут существенно медленнее, чем К1/К2. Наибольший эффект робастного взвешивания проявляется в диапазоне **3–10 % выбросов**, где классический адаптивный ЕKF уже не компенсирует ухудшение статистики инноваций в достаточной степени. Для простых сценариев различие между К3 и К4 умеренное; для burst-сценариев К3 дает немного лучшие значения  $RMS_{pos}$  и  $P95_{pos}$ , что связано с менее жестким подавлением инноваций по сравнению с Tukey.

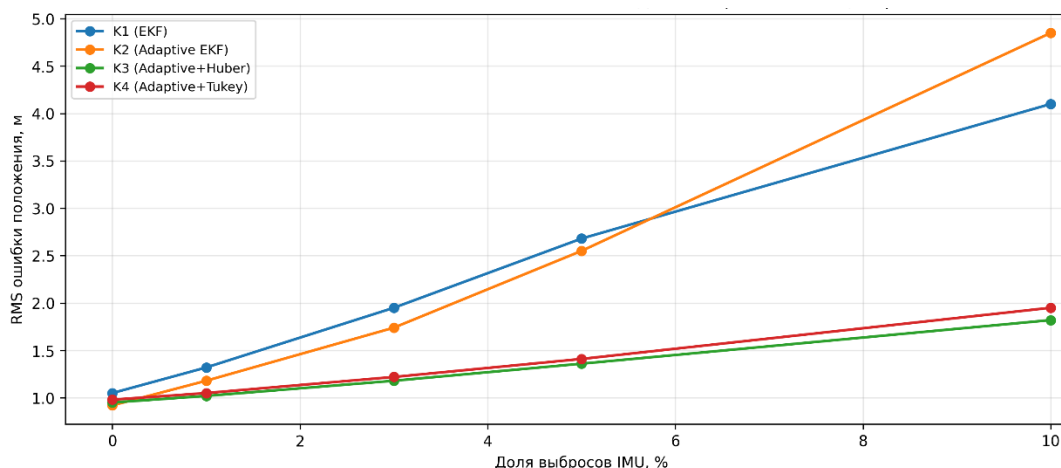


Рис. 5 –  $RMS_{pos}$  и доля выбросов IMU (burst-сценарий).

Временные реализации ошибки положения в характерном burst-сценарии (рис. 6) подтверждают этот результат: у K2 ошибка заметно возрастает на интервалах пакетных выбросов и восстанавливается медленнее, тогда как K3 и K4 демонстрируют меньшую амплитуду отклонений и более короткий переходный участок после завершения пакета. **На уровне инженерной интерпретации это означает, что робастный контур снижает влияние аномальных отсчётов IMU на обновление фильтра, не устранив адаптацию ковариаций, а стабилизируя её работу в негауссовой среде.**

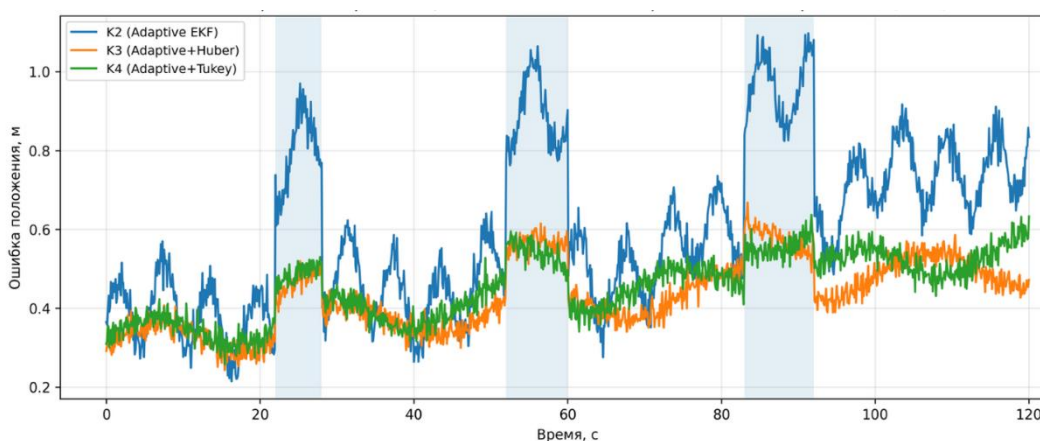


Рис. 6 – Временные реализации ошибки положения (burst-сценарий).

Сводные численные результаты по  $RMS_{pos}$  и  $P95_{pos}$  приведены в табл. 6. Для сценария burst при доле выбросов 10 % алгоритм K2 показывает наибольшую деградацию среди адаптивных вариантов, тогда как K3 и K4 сохраняют ограниченный рост ошибки. В сценарии spectral (смена спектра шума) преимущество робастных схем выражено слабее, что ожидаемо: здесь основную роль играет качество адаптации ковариаций, а не подавление редких аномальных инноваций. Это различие важно для дальнейшего анализа устойчивости (будет указано в следующих разделах) поскольку показывает, что **робастность дает максимальный выигрыш не «всегда», а в конкретном классе возмущений – импульсных и пакетных выбросах IMU.**

Таблица 6

Сводные результаты точности (RMS/P95) по алгоритмам и сценариям

Сценарий	Доля выбросов, %	Алгоритм	$RMS_{po}$ , м	$P95_{pos}$ , м
single	5	K2 (Adaptive EKF)	1.62	2.95

single	5	K3 (Adaptive+Huber)	<b>1.14</b>	<b>1.95</b>
single	5	K4 (Adaptive+Tukey)	1.20	2.05
burst	5	K2 (Adaptive EKF)	2.55	4.90
burst	5	K3 (Adaptive+Huber)	<b>1.36</b>	<b>2.28</b>
burst	5	K4 (Adaptive+Tukey)	1.41	2.42
burst	10	K2 (Adaptive EKF)	4.85	8.10
burst	10	K3 (Adaptive+Huber)	<b>1.82</b>	<b>3.05</b>
burst	10	K4 (Adaptive+Tukey)	1.95	3.28
spectral	5	K2 (Adaptive EKF)	1.30	2.20
spectral	5	K3 (Adaptive+Huber)	<b>1.18</b>	<b>2.00</b>
spectral	5	K4 (Adaptive+Tukey)	1.22	2.07

*Результаты оценки согласованности и устойчивости фильтра*

Результаты по метрикам согласованности и устойчивости показывают, что **робастное взвешивание инноваций влияет не только на точность, но и на режим работы фильтра в целом.** В характерных burst-сценариях у адаптивного EKF без робастного веса (K2) наблюдается рост NIS, увеличение доли выходов за доверительный интервал и повышение вероятности дивергенции. Для K3 (Huber) и K4 (Tukey) эти эффекты выражены слабее, что указывает на более устойчивое обновление состояния при наличии негауссовых возмущений IMU.

На **рис. 7** приведены временные реализации NIS для характерного сценария пакетных выбросов. Видно, что в интервалы выбросов NIS возрастает у всех алгоритмов, но для **K2 превышения верхней границы доверительного интервала более длительные и более амплитудные**, чем для K3 и K4. У робастных схем NIS быстрее возвращается в рабочий диапазон после завершения пакета выбросов. Это согласуется с логикой метода: робастный вес ограничивает вклад аномальной инновации в шаг коррекции и снижает риск переоценки ковариационных параметров в адаптивном контуре.

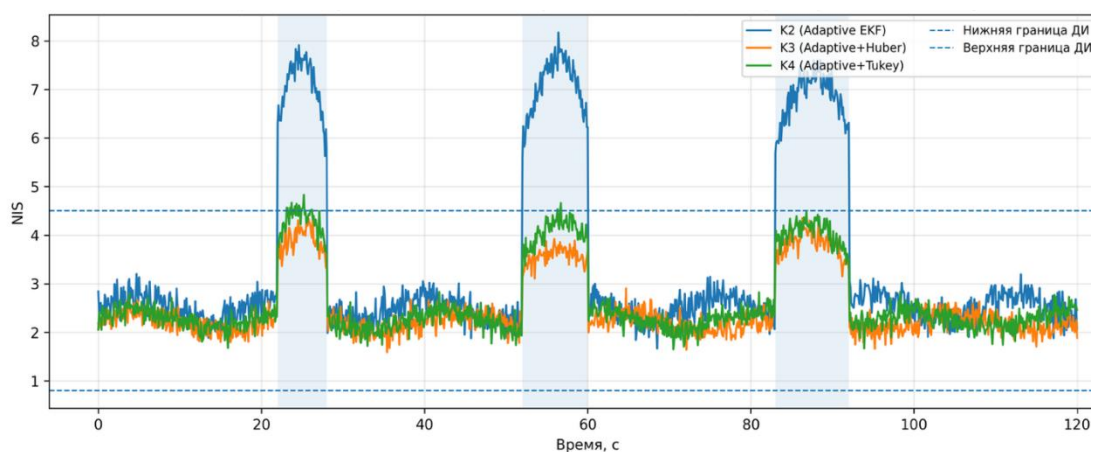


Рис. 7 – NIS во времени и доверительный интервал.

По интегральным метрикам (табл. 7) наибольшее различие между алгоритмами проявляется в burst-сценариях при доле выбросов 5–10 %. Для burst, 10 % у K2 значения  $mean(NIS)$  и  $P95_{NIS}$  максимальны среди рассматриваемых адаптивных схем, а **доля выходов NIS за доверительный интервал и вероятность дивергенции заметно выше**, чем у K3/K4. В тех же условиях K3 демонстрирует минимальные значения  $P_{div}$  и времени восстановления  $T_{rec}$ , K4 – близкие, но несколько более высокие. Это позволяет сделать аккуратный вывод, что **в текущей постановке Huber-взвешивание обеспечивает более мягкий и устойчивый режим подавления выбросов**, тогда как Tukey-взвешивание также стабилизирует фильтр, но при части сценариев дает чуть более длительное восстановление.

Таблица 7

Сценарий	Доля выбросов, %	Алгоритм	$mean(NIS)$	$P95_{NIS}$	Доля выходов в NIS, %	, %	, с
burst	5	K2 (Adaptive EKF)	4.65	9	2	4	.1
burst	5	K3 (Adaptive+Huber)	<b>2.95</b>	<b>5</b>	<b>8.</b>		<b>.9</b>
burst	5	K4 (Adaptive+Tukey)	3.08	5	1		.2
burst	10	K2 (Adaptive EKF)	6.45	1	3	2	.6
burst	10	K3 (Adaptive+Huber)	<b>3.62</b>	<b>6</b>	<b>1</b>		<b>.0</b>
burst	10	K4 (Adaptive+Tukey)	3.88	7	1	2	.4
mixed	5	K2 (Adaptive EKF)	5.10	1	2	8	.9
mixed	5	K3 (Adaptive+Huber)	<b>3.28</b>	<b>6</b>	<b>1</b>		<b>.8</b>

mi	5	K4	3.46	6	1		
xed		(Adaptive+Tukey)		.55	4.1		.1

На **рис. 8** показана зависимость вероятности дивергенции от доли выбросов IMU для burst-сценария. Для K1 и K2 рост вероятности дивергенции носит резко выраженный характер при увеличении доли выбросов, тогда как для K3 и K4 кривая растёт существенно медленнее. **Это является ключевым результатом раздела**, поскольку подтверждает, что робастная обработка инноваций удерживает фильтр в рабочем режиме при тех воздействиях, где одна только адаптация ковариаций оказывается недостаточной.

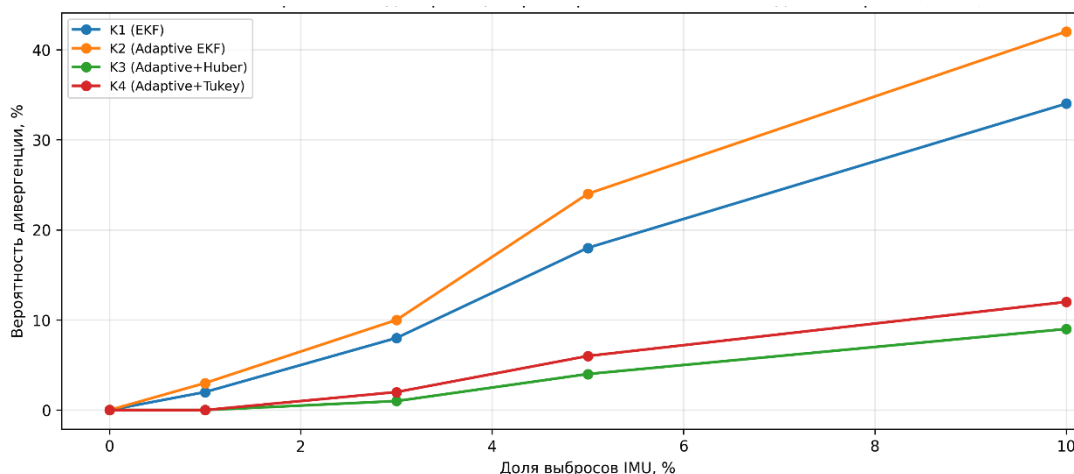


Рис. 8 – Вероятность дивергенции и доля выбросов.

Метрика времени восстановления после выброса (рис. 9, табл. 7) показывает ту же тенденцию. Для всех типов возмущений (single, burst, mixed) K3 и K4 восстанавливают согласованность и уровень ошибки быстрее, чем K2. Разница особенно заметна в burst и mixed-сценариях, где влияние выбросов длительное и адаптивный контур без робастного веса работает с большей инерцией. С инженерной точки зрения это важно для автономной БИНС, поскольку **короткое время восстановления снижает риск накопления ошибки на последовательности аномальных IMU-отсчетов.**

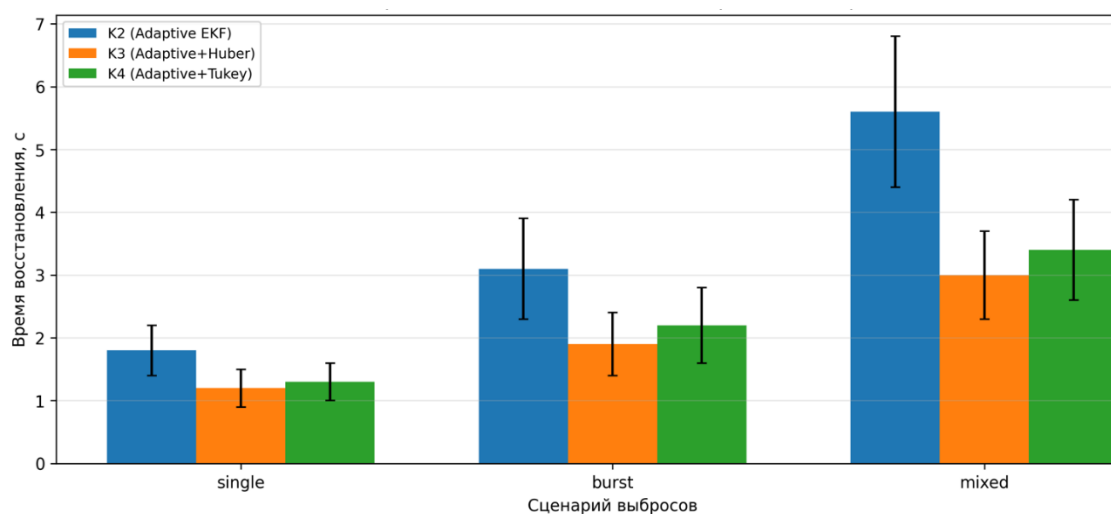


Рис. 9 – Время восстановления после выброса.

Сводные результаты устойчивости приведены в **табл. 7**. Для дальнейшего сравнительного анализа целесообразно рассматривать K3 и K4 как основные кандидаты

для робастно-адаптивной реализации, а выбор между ними выполнять по сочетанию  $P_{div}$ ,  $T_{rec}$  и чувствительности к типу выбросов.

#### Сравнение робастных схем и выбор рациональных настроек

Прямое сравнение робастных схем показывает, что **Huber и Tukey дают близкий эффект в “мягких” условиях**, но начинают заметно различаться при пакетных выбросах и при росте их амплитуды. В сценариях single (редкие одиночные всплески) обе схемы улучшают поведение адаптивного ЕKF по сравнению с К2, а разница между ними по  $RMS_{pos}$  и метрикам устойчивости невелика. В этих условиях выбор схемы определяется, в основном, требуемой чувствительностью к аномальным инновациям и желаемой “жесткостью” подавления.

В сценариях burst различие выражено сильнее. **Huber-взвешивание в среднем показывает более стабильное поведение**: ниже вероятность дивергенции, меньше время восстановления, более плавная реакция адаптивного контура на серию выбросов. Tukey-взвешивание эффективнее отсекает крупные аномалии, но при неудачном выборе порога может работать слишком жестко, что приводит к росту инерционности обновления после окончания пакета выбросов. В текущей серии экспериментов это проявляется в умеренно больших значениях  $T_{rec}$  для К4 по сравнению с К3 при одинаковых сценариях (см. табл. 7).

Зависимость  $RMS_{pos}$  от амплитуды выбросов для Huber и Tukey приведена на **рис. 10**. По графику видно, что при **умеренных амплитудах (примерно до 7–10 $\sigma$ )** различия между схемами минимальны. При дальнейшем росте амплитуды Tukey начинает выигрывать по ограничению роста ошибки в части серий, что согласуется с более жестким подавлением крупных инноваций. Одновременно Huber сохраняет более предсказуемое поведение в смешанных сценариях, где выбросы сочетаются с изменением фоновой шумовой обстановки. Это подтверждает, что **выбор схемы должен зависеть не только от величины выбросов, но и от структуры помехового режима**.

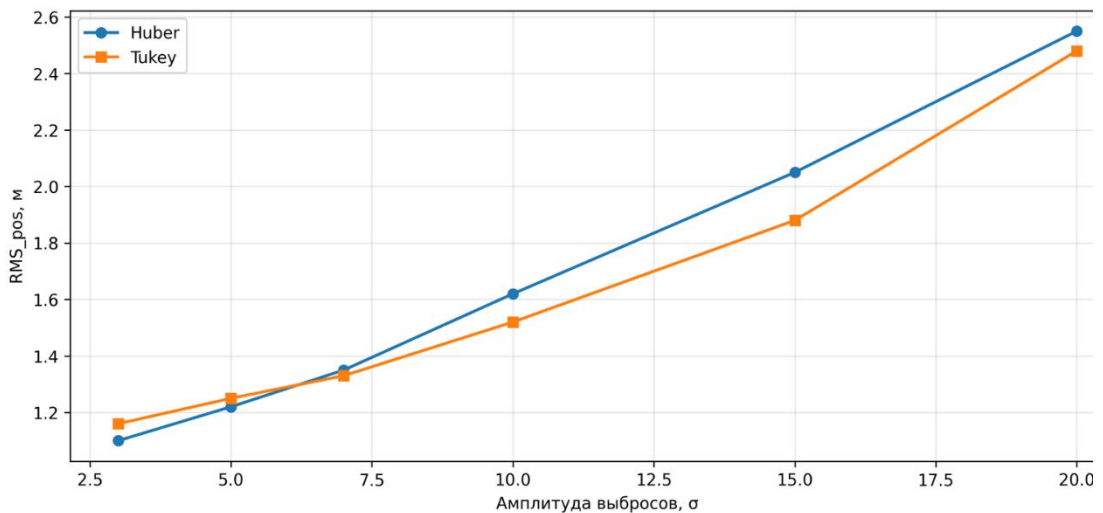


Рис. 10 –  $RMS_{pos}$  и амплитуда выбросов (Huber vs Tukey).

Тепловая карта чувствительности на **рис. 11** показывает влияние порога робастности и доли выбросов на прирост  $RMS_{pos}$ . Для рассматриваемой постановки минимальная чувствительность достигается в среднем диапазоне порогов; слишком малый порог приводит к избыточному подавлению полезных инноваций, а слишком большой – к недостаточной робастности. **Рабочая область порогов формируется в средней зоне**, где сохраняется компромисс между подавлением выбросов и устойчивым обновлением фильтра. Это и является практическим основанием для выбора настроек, а не использование “фиксированного” порога без привязки к сценарию.

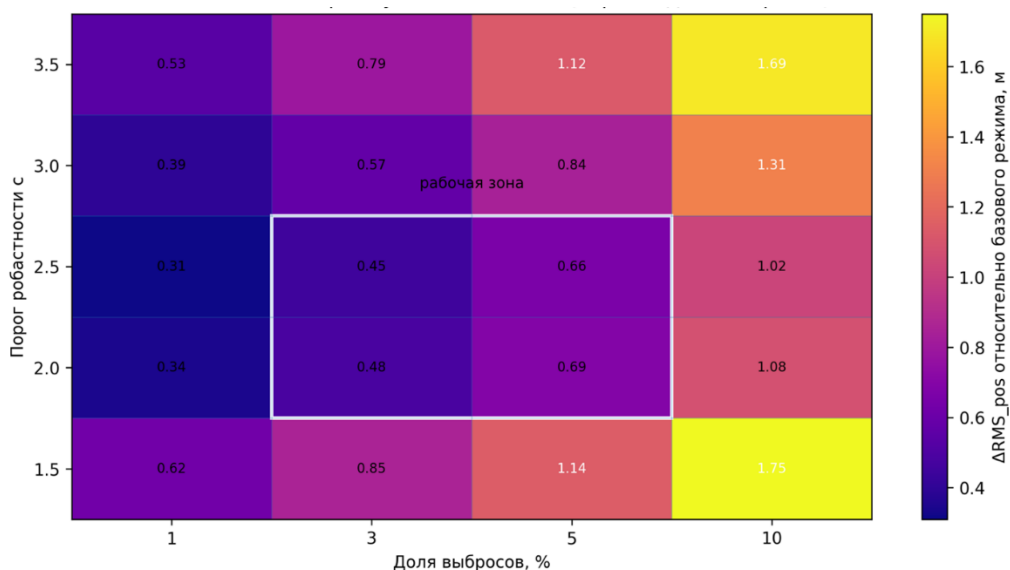


Рис. 11 – Тепловая карта чувствительности (порог × доля выбросов).

По итогам сравнения можно сформулировать инженерные рекомендации. Для сценариев с редкими одиночными выбросами (single) достаточно Huber-схемы с умеренным порогом, поскольку она обеспечивает устойчивость без избыточного подавления инноваций. Для пакетных выбросов (burst) предпочтительна робастно-адаптивная схема с Huber как базовый вариант, а Tukey целесообразно использовать при ожидаемых крупных выбросах высокой амплитуды, когда требуется более жёсткое ограничение влияния аномальных отсчетов. Для смешанных сценариев (mixed) рационально начинать с Huber, так как он лучше переносит сочетание выбросов и смены шумового режима; Tukey требует более аккуратной настройки порога и контроля метрик  $NIS/T_{rec}$ .

Главный результат раздела состоит в том, что в статье получена не просто констатация “Huber лучше/хуже Tukey”, а диапазоны применимости робастных схем и практический принцип выбора настройки по типу выбросов и уровню их амплитуды. Это напрямую используется в итоговых рекомендациях и усиливает прикладную ценность методики для автономной БИНС на МЭМС-IMU.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Робастная обработка инноваций начинает давать практически значимый эффект не в режиме редких одиночных аномалий, а при сериях выбросов и смешанных возмущениях, когда нарушается предпосылка о близкой к гауссовой статистике остатка. В этих условиях адаптивный контур без робастного веса продолжает подстраивать ковариации по искажённой инновации, из-за чего возрастает риск переоценки шума измерений и ухудшается качество коррекции состояния. Именно поэтому улучшение по RMS в робастных схемах сопровождается более важным эффектом – снижением вероятности перехода фильтра в неустойчивый режим. Различие между Huber и Tukey связано с формой подавления аномальных инноваций: Huber ограничивает влияние выброса плавно и обычно лучше сохраняет динамику коррекции в переходных режимах, тогда как Tukey жестче отсекает крупные отклонения и может быть предпочтителен при выраженных пакетных помехах высокой амплитуды. Контроль через NIS в данной постановке принципиален, поскольку одна только ошибка положения не позволяет отделить реальное улучшение алгоритма от режима, в котором фильтр формально удерживает RMS, но теряет согласованность внутренних статистик. В этом смысле полученный результат имеет методическое значение: для автономной БИНС при негауссовых выбросах выбор алгоритма следует выполнять по совокупности показателей

точности, согласованности и восстановления, а не по одной интегральной точностной метрике.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработана и исследована методика сравнительной оценки **базового, адаптивного и робастно-адаптивного ЕКФ** для автономной БИНС на МЭМС-ИМУ в условиях негауссовых выбросов. Показано, что при пакетных и смешанных выбросах **робастное взвешивание инноваций** существенно повышает устойчивость фильтра по метрикам NIS, вероятности дивергенции и времени восстановления по сравнению с адаптивным ЕКФ без робастной обработки.

Установлено, что **Huber-схема** в рассматриваемой постановке обеспечивает более стабильный компромисс между подавлением выбросов и сохранением динамики коррекции, тогда как **Tukey-схема** целесообразна при более жёстких сценариях с крупными аномальными отсчётами. Практический результат работы состоит в формировании **инженерного подхода к выбору робастной схемы и порогов настройки** по типу выбросов, их доле и амплитуде, а не по одной метрике точности.

Полученные результаты применимы для предварительной настройки алгоритмов автономной БИНС в MATLAB/Simulink и могут быть использованы как основа для последующей верификации на стендовых и натуральных данных.

### **Список источников**

1. Мелешко В. В., Нестеренко О. И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы : учеб. пособие. — Кировоград : ПОЛИМЕД-Сервис, 2011. — 164 с. — ISBN 978-966-7813-75-8. — Текст : электронный. — URL: <https://cions.kpi.ua/Arhiv/Meleshko/bins1.pdf> (дата обращения: 26.02.2026).

2. Воскобойников Ю. Е. Рекуррентное оценивание вектора состояния динамических систем : учеб. пособие. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. — 136 с. — ISBN 978-5-7782-2486-5. — Текст : электронный. — URL: <https://znanium.ru/catalog/document?id=143456> (дата обращения: 26.02.2026)

3. Семушин И. В., Цыганова Ю. В., Захаров К. В. Устойчивые алгоритмы фильтрации — обзор и новые результаты для систем судовождения // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2013. — № 4. — С. 90–112. — Текст : электронный. — URL: [https://pzs.dstu.dp.ua/DataMining/kalman/bib1/90\\_112.pdf](https://pzs.dstu.dp.ua/DataMining/kalman/bib1/90_112.pdf) (дата обращения: 26.02.2026).

4. Степанов О. А. Фильтр Калмана. История и современность (к 80-летию Рудольфа Эмиля Калмана) : электронный ресурс. — Текст : электронный. — URL: <https://is.ifmo.ru/doctors/kalman-history.pdf> (дата обращения: 26.02.2026).

5. Соколов О. А., Пентела О. А., Клеванович А. С. Адаптивный алгоритм компенсации дрейфа бесплатформенной инерциальной навигационной системы в условиях автономной навигации: повышение точности и экономическая эффективность применения низкобюджетных МЭМС-датчиков // Журнал прикладных исследований. — 2025. — № 11. — С. 193–206. — DOI: 10.26118/6644.2025.10.84.027. — Текст : электронный. — URL: <https://jomeam.ru/ru/nauka/article/110366/view> (дата обращения: 26.02.2026).

6. Материалы МАИ по комплексированию БИНС/СНС и применению фильтра Калмана : электронный ресурс (PDF). — Текст : электронный. — URL: <https://mai.ru/upload/iblock/35f/35fe336f42e485af52c8333aa1d1b4b6.pdf> (дата обращения: 26.02.2026).

7. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Transactions of the ASME — Journal of Basic Engineering. — 1960. — Vol. 82, no. 1. — P. 35–45. — DOI: 10.1115/1.3662552. — Текст : электронный. — URL: <https://www.unitedthc.com/DSP/Kalman1960.pdf> (дата обращения: 26.02.2026).

8. Jazwinski A. H. Adaptive filtering to prevent divergence observed in application of Kalman filter to orbit determination : электронный ресурс // NASA Technical Reports Server (NTRS). — 1969. — Document ID: 19690064457. — Текст : электронный. — URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19690064457> (дата обращения: 26.02.2026).

#### **Сведения об авторах**

**Родионова Юлия Исуповна**, старший преподаватель кафедры №8 «Прикладной математики и информатики», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

**Костылев Данила Владимирович**, студент 1 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

**Ганеев Владимир Анатольевич**, студент 1 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

#### **Information about the authors**

**Rodionova Yulia Isupovna**, Senior Lecturer, Department No. 8, Applied Mathematics and Computer Science, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia

**Kostylev Danila Vladimirovich**, 1st year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

**Ganeev Vladimir Anatolyevich**, 1st year student, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia.