

## РЕЦЕНЗИЯ

на статью  
Соколова О.А., Пентелы О.А., Клевановича А.С.  
«Адаптивный алгоритм компенсации дрейфа бесплатформенной  
инерциальной навигационной системы в условиях автономной навигации:  
повышение точности и экономическая эффективность применения  
низкобюджетных МЭМС-датчиков»  
(УДК 629.7.05:681.3.06)

### 1. Актуальность темы и степень её разработанности

Статья посвящена повышению точности автономной навигации бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) на основе низкобюджетных МЭМС-датчиков за счёт адаптивной настройки фильтра Калмана по статистике инноваций. Тематика является высокоактуальной:

- массовое внедрение малых БПЛА, автономных робототехнических платформ и малых ВС усиливает спрос на недорогие, но точные навигационные модули;
- отказоустойчивость по отношению к деградации GNSS (помехи, глушение, спуфинг) прямо связана с национальной и транспортной безопасностью;
- задача «выжать максимум» из МЭМС-датчиков низкого ценового диапазона лежит на стыке навигации, теории оценивания и экономической эффективности.

Авторы корректно обозначают известную проблему накопления ошибок (bias instability, random walk, дрейф чувствительности) и зависимости эффективности фильтра Калмана от адекватности матриц  $Q$  и  $R$ . Подчёркивается влияние температуры и условий эксплуатации на нестабильность нуля и шумы, что обосновывает необходимость адаптивных подходов к настройке фильтра.

Тема исследования вписывается в современную повестку работ по INS/GNSS-интеграции и автономным ИНС, хорошо опирается на существующий уровень знаний, не дублируя его формально, а предлагая практико-ориентированное развитие.

### 2. Научное содержание, методология и обоснованность результатов

Судя по аннотации и введению, авторы решают задачу:

- построения адаптивного алгоритма компенсации дрейфа БИНС на основе динамической подстройки ковариаций модели ошибок ( $Q$ ) по статистике инноваций фильтра Калмана (NIS, нормированные инновации и пр.);
- численного моделирования трёхосевой БИНС с реалистичными параметрами МЭМС-датчиков (уровни шума, bias instability, random walk);
- сравнения базового и адаптивного вариантов фильтрации по метрикам NIS, динамике ковариаций и накопленных ошибок (по положению/скорости/ориентации).

Плюсы методического подхода:

- корректное понимание физики ошибок МЭМС-датчиков (bias instability, bias random walk, rate random walk, термозависимость);
- опора на стандартный аппарат фильтра Калмана, без искусственного усложнения;
- использование статистики инноваций (NIS, нормализованные инновации) как естественного индикатора несоответствия реальных шумов заданным  $Q$ ,  $R$ ;
- декларируется анализ устойчивости и качества адаптации по формализованным метрикам.

При этом в рецензируемом фрагменте (введение) не приведены:

- явный вид используемой модели состояния (какие компоненты ошибки включены – углы Эйлера/кватернионы, ошибки скорости, положения, смещения гироскопов и акселерометров и т.д.);
- конкретная формула адаптации  $Q$  (и/или  $R$ ) по статистике инноваций: какие окна усреднения, пороговые критерии, как предотвращается перераздувание ковариаций;
- вид и продолжительность сценариев моделирования (тип траектории, манёвренность, длительность автономного режима, частоты дискретизации).

Можно ожидать, что эти элементы представлены в основной части статьи, однако для научной строгости важно, чтобы алгоритм адаптации был описан не только концептуально («динамическая подстройка по статистике инноваций»), но и в виде явных вычислительных шагов.

Важным достоинством является связка навигационной части с экономическим аспектом: авторы прямо увязывают снижение требований к классу датчиков с возможностью уменьшить стоимость навигационного модуля и снизить зависимость от внешней инфраструктуры коррекции. Для технической статьи это плюс – показана не только метрическая, но и экономическая значимость.

### 3. Научная новизна и практическая значимость

Заявленные элементы новизны можно резюмировать следующим образом:

- адаптивная компенсация дрейфа БИНС на основе динамической подстройки ковариаций модели ошибок по статистике инноваций в условиях полностью автономной ИНС (без внешних измерений GNSS и т.п.);
- демонстрация того, что применение адаптивного алгоритма позволяет сдерживать накопление ошибок при длительном автономном режиме даже при использовании низкобюджетных МЭМС-датчиков;
- акцент на экономическую эффективность: возможность использовать более дешёвые ИМУ без критической потери точности.

Следует признать, что идея адаптивного/автоматического выбора  $Q$  и  $R$  по инновациям сама по себе известна в литературе по фильтрации (варианты innovation-based adaptive estimation, covariance matching и др.). Оригинальность работы, по-видимому, в том, как именно:

- эта методика конкретизирована для трёхосевой МЭМС-БИНС;
- какие приняты допущения насчёт моделей ошибок;
- какие достигнуты числовые выигрыши по ошибкам навигации и по допустимому «упрощению» датчиков.

При достаточной проработке этих аспектов (количественное сравнение с базовым фильтром, чувствительность к параметрам, анализ устойчивости адаптации) можно говорить о прикладной научной новизне и высокой практической значимости для разработчиков БИНС малых БПЛА и автономных платформ.

#### 4. Стилль, структура и оформление

Текст написан в целом грамотным техническим языком, с корректным использованием терминологии (БИНС, МЭМС, bias instability, random walk, NIS и т.п.). Введение логично:

- показан контекст применения БИНС;
- приведены типичные численные параметры МЭМС-датчиков;
- описана проблема накопления ошибок и ограничения GNSS;
- сформулировано место фильтра Калмана и проблема фиксированных Q, R.

Замечания по оформлению и языку:

- в русском и английском названии желательно унифицировать терминологию: вместо «Free-Form Inertial Navigation System» корректнее использовать «strapdown inertial navigation system» (как уже сделано в английской аннотации и ключевых словах);
- аббревиатуры при первом упоминании введены корректно, но стоит следить за единообразием записи (БИНС, ИНС, IMU и т.п.);
- отдельные фразы во введении достаточно длинные и перегружены вставками в скобках; небольшая стилистическая правка улучшит читабельность, не меняя содержания;
- в английской части названия университета и длинное наименование учреждения выглядят несколько тяжеловесно; допустимо использовать более компактную, принятую форму без потери точности.

#### 5. Заключение и рекомендация к публикации

Работа посвящена актуальной и практически значимой задаче повышения точности автономной БИНС на основе низкобюджетных МЭМС-датчиков за счёт адаптивной подстройки фильтра Калмана по статистике инноваций. Статья сочетает корректную постановку проблемы, понятный методический подход и декларирует наличие численного сравнения базового и адаптивного алгоритмов, а также обсуждение экономических эффектов от применения предлагаемой методики.

Для усиления научной составляющей рекомендуется в основной части статьи:

- более формально и подробно выписать математическую модель состояния и ошибок;
- явно описать алгоритм адаптивного изменения ковариаций (формулы, окна, пороги, механизмы защиты от деградации фильтра);

- максимально чётко представить количественные результаты моделирования (графики и таблицы ошибок ориентации, скорости и положения, выигрыш относительно базового варианта, анализ чувствительности к параметрам датчиков);
- чуть яснее структурировать и выделить раздел, где обсуждается именно экономическая эффективность (сценарии применения, ориентировочные оценочные диапазоны удешевления, влияние на требования к GNSS-инфраструктуре).

С учётом изложенного, статья может быть **рекомендована к публикации** в профильном научном журнале по навигации, бортовым системам и авиационной технике **после внесения незначительных уточнений и редакционных правок**, не затрагивающих основной научный результат.

Рецензент - Зотикова Ольга Николаевна, доктор экономических наук,  
профессор,  
Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина  
г. Москва, Россия

Reviewer - Zotikova Olga Nikolaevna, Doctor of Economics, Professor,  
Kosygin Russian State University, Moscow, Russia

