

Мирзоев Артём Олимбекович

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской
авиации им. А.А. Новикова

Дуюнов Дмитрий Витальевич

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской
авиации им. А.А. Новикова

Сагитов Дамир Ильдарович

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской
авиации им. А.А. Новикова

Экономическая оценка влияния температурных погрешностей авиационных систем на эксплуатационные расходы и управление рисками безопасности полетов

Аннотация. Статья представляет комплексный экономический анализ проблемы температурной нестабильности критически важных авиационных датчиков (давления, температуры, скорости), трансформируя инженерные погрешности в измеримые финансовые риски: рост эксплуатационных расходов (ОРЕХ) на частое обслуживание и калибровку, убытки от ложных отказов и простоев воздушных судов, а также потенциально катастрофические потери. Целью исследования является разработка экономико-математической модели для обоснования инвестиций в современные системы температурной компенсации (пассивные, активные, алгоритмические). Методология включает сравнительный анализ совокупной стоимости владения (ТСО), оценку рисков методом FMEA в денежном выражении и сценарное моделирование денежных потоков в горизонте жизненного цикла (LCC). Результатом является практический инструмент для принятия решений — финансовая модель, демонстрирующая на примере парка воздушных судов ключевые показатели (NPV, IRR) и доказывающая, что капиталовложения в интеллектуальные датчики и алгоритмическую компенсацию, несмотря на высокие первоначальные затраты (CAPEX), являются стратегическим вкладом в долгосрочное снижение совокупных затрат и управление репутационными рисками. Делается вывод о необходимости интеграции критериев LCC и ТСО в процедуры закупок для перехода от обслуживания по регламенту к предиктивной модели.

Ключевые слова: экономика авиаперевозок, эксплуатационные расходы (ОРЕХ), управление рисками, стоимость жизненного цикла (LCC), инвестиции в безопасность, экономическая эффективность технологий, авиационные датчики, отказоустойчивость, экономико-математическая модель, FMEA, цифровизация.

Mirzoev Artyom Olimbekovich

Novikov Saint Petersburg State University of Civil Aviation

Dunov Dmitry Vitalievich

Novikov Saint Petersburg State University of Civil Aviation

Sagitov Damir Ildarovich

Novikov Saint Petersburg State University of Civil Aviation

Economic assessment of the impact of temperature errors in aviation systems on operating costs and flight safety risk management

Annotation. The article presents a comprehensive economic analysis of the problem of temperature instability of critical aircraft sensors (pressure, temperature, velocity), transforming engineering errors into measurable financial risks: increased operating costs (OPEX) for frequent

maintenance and calibration, losses from false failures and downtime of aircraft, as well as potentially catastrophic losses. The aim of the research is to develop an economic and mathematical model to justify investments in modern temperature compensation systems (passive, active, algorithmic). The methodology includes comparative total cost of ownership (TCO) analysis, FMEA risk assessment in monetary terms, and scenario modeling of cash flows over the lifecycle horizon (LCC). The result is a practical decision-making tool - a financial model that demonstrates key performance indicators (NPV, IRR) using the example of an aircraft fleet and proves that investments in intelligent sensors and algorithmic compensation, despite high initial costs (CAPEX), are a strategic contribution to long-term reduction of total costs and reputational risk management. It is concluded that it is necessary to integrate the LCC and TCO criteria into the procurement procedures for the transition from routine maintenance to a predictive model.

Keywords: economics of air transportation, operating costs (OPEX), risk management, cost of life cycle (LCC), investments in safety, cost-effectiveness of technologies, aviation sensors, fault tolerance, economic and mathematical model, FMEA, digitalization.

Проблема температурной нестабильности авиационных датчиков представляет собой не только инженерную, но и существенную экономическую задачу, поскольку технические погрешности напрямую трансформируются в финансовые риски: рост эксплуатационных расходов (OPEX) на частое обслуживание и калибровку, убытки от ложных отказов и простоев воздушных судов, а также потенциально катастрофические потери от авиационных происшествий [5, с. 159]. Целью данного исследования является разработка экономико-математической модели для обоснования инвестиций в современные системы температурной компенсации. В работе на основе анализа технических факторов строятся и сравниваются модели совокупной стоимости владения (TCO) для различных сценариев — от традиционного обслуживания до внедрения «умных» датчиков, с применением методологии FMEA для оценки рисков в денежном выражении и сценарного моделирования. Результатом является инструмент для принятия управленческих решений, доказывающий, что капиталовложения в термостабильность являются стратегическим вкладом в минимизацию совокупных рисков и управление рентабельностью на протяжении всего жизненного цикла (LCC) авиационной техники.

К основным типам авиационных датчиков, обеспечивающим безопасность и эффективность полета, относятся несколько ключевых категорий, классифицируемых по измеряемому физическому параметру. Наиболее критичными являются датчики давления, температуры, скорости и положения. Датчики давления (прессор-статические) включают в себя датчики абсолютного давления, дифференциального давления и давления воздуха в приемнике воздушных давлений (ПВД), которые используются для определения высоты полета, скорости и числа Маха. Принцип их работы часто основан на использовании тензометрических преобразователей или емкостных сенсоров, где деформация чувствительной мембраны под воздействием давления преобразуется в электрический сигнал. Датчики температуры, такие как термосопротивления (RTD) и термопары, являются не менее важными. Термосопротивления, основанные на зависимости электрического сопротивления металла (обычно платины) от температуры, применяются для точных измерений в широком диапазоне, например, температуры топлива или гидравлической жидкости. Принцип работы термопар основан на эффекте Зеебека, схему которого можно видеть на рисунке 1, когда в месте спая двух разнородных металлов возникает термо-ЭДС, пропорциональная разности температур между спаем и свободными концами; они широко используются для контроля температуры газов в турбинах двигателей [3, с.80].

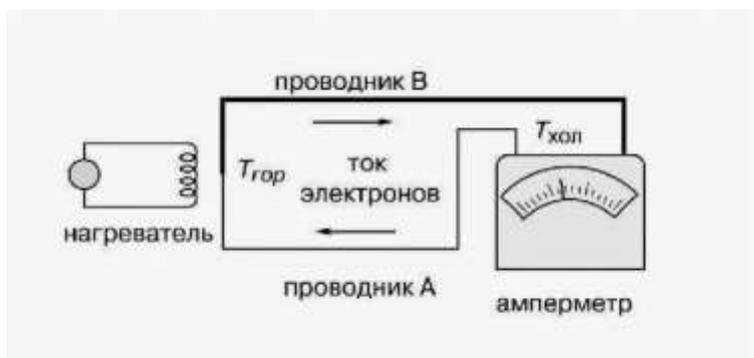


Рисунок 1. Эффект Зеебека.

Датчики скорости, прежде всего указатели воздушной скорости, работают в комплексе с ПВД, измеряя разность между полным и статическим давлением набегающего потока воздуха, которая преобразуется в значение скорости. Для измерения положения и перемещения органов управления (рулей высоты, элеронов, закрылков) и шасси широко применяются потенциометрические датчики, линейные дифференциальные трансформаторы (LVDT) и сельсины [1, с.2]. Потенциометрические датчики преобразуют механическое перемещение в изменение сопротивления, а следовательно, и выходного напряжения, их электрические схемы изображены на рисунке 2.

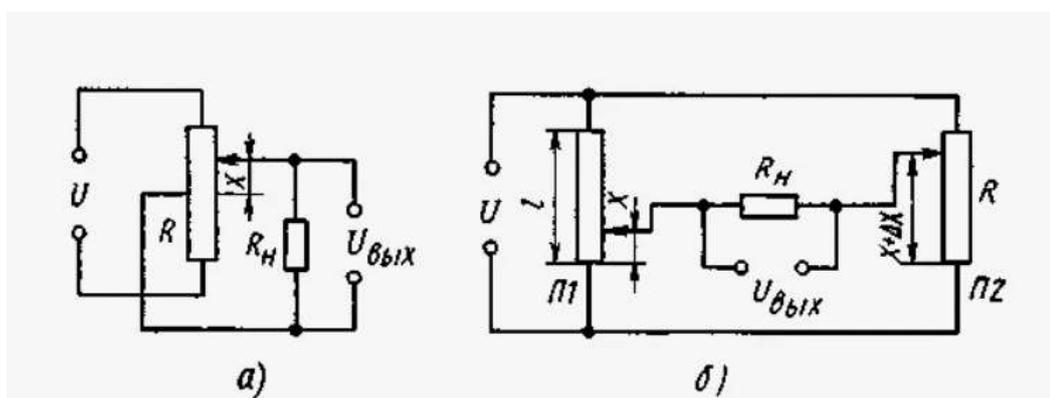


Рисунок 2. Реверсивные схемы потенциометрических датчиков перемещения.

LVDT, основанные на принципе взаимной индукции, обеспечивают бесконтактное и высокоточное измерение линейного перемещения. Сельсины же используются для дистанционной передачи угла поворота, работая по принципу трансформатора, где электрический сигнал пропорционален угловому положению ротора. Отдельно стоит выделить датчики вибрации (акселерометры) и датчики контроля частоты вращения (тахометры) валов двигателей, которые часто используют индуктивный или оптоэлектронный принцип действия [2, с. 200]. Совокупность этих разнообразных по принципу действия, но взаимосвязанных в единой системе датчиков формирует информационную основу для работы бортовой аппаратуры и принятия решений экипажем.

Существующие методы компенсации (пассивные, активные, алгоритмические) представляют собой альтернативные инвестиционные проекты с различной структурой капитальных (CAPEX) и эксплуатационных (OPEX) расходов. Экономическая модель влияния этих погрешностей выделяет четыре основных канала формирования дополнительных OPEX: 1) рост затрат на частое обслуживание и калибровку в термобарокамерах; 2) убытки от ложных отказов, ведущих к задержкам рейсов и простоям ВС; 3) косвенные потери от перерасхода топлива из-за неоптимальных режимов работы, вызванных неточными данными; 4) увеличение затрат на ремонт и замену смежных систем из-за ускоренного износа. Для количественной оценки наиболее критичных рисков применяется метод FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), позволяющий присвоить

каждому виду погрешности вероятностную оценку потенциального финансового ущерба, включая страховые выплаты, потерю репутации и судебные издержки, что формирует понятие «стоимости риска». [4]

В рамках сравнительного инвестиционного анализа рассматриваются три ключевых сценария с различной структурой затрат. Базовый сценарий (Status Quo) характеризуется низкими капитальными вложениями (CAPEX), но высокими эксплуатационными расходами (OPEX) из-за частых калибровок и повышенных рисков. Сценарий аппаратной компенсации предполагает умеренный рост CAPEX на специализированные материалы и схемы, что ведет к снижению OPEX благодаря повышенной стабильности и сокращению обслуживания. Наиболее технологичный сценарий — внедрение алгоритмической компенсации и «умных» датчиков — связан с высокими первоначальными затратами на разработку ПО и микроэлектронику, но обеспечивает максимальное снижение OPEX и рисков, а также открывает потенциал для получения дополнительного дохода от данных предиктивной аналитики. Для объективной оценки строится модель совокупной стоимости владения (ТСО) и жизненного цикла (LCC) на горизонте 10–15 лет, где для каждого сценария прогнозируются денежные потоки, определяется точка безубыточности инвестиций, а будущая экономия (снижение OPEX) приводится к текущей стоимости с использованием фактора дисконтирования. Практическая применимость модели демонстрируется в кейс-стади на примере парка из 50 узкофюзеляжных воздушных судов. На основе сравнения ежегодных затрат на калибровку стандартных и термокомпенсированных датчиков давления, а также оценки вероятности и потенциального ущерба от инцидентов, рассчитываются ключевые показатели эффективности инвестиций — чистый приведенный доход (NPV) и внутренняя норма доходности (IRR) проекта модернизации.

Технические решения в области температурной компенсации должны приниматься на основе строгой экономической целесообразности, где выбор оптимального уровня компенсации представляет собой задачу комплексной оптимизации соотношения капитальных затрат (CAPEX), эксплуатационных расходов (OPEX) и совокупных финансовых рисков (RISK). Интеллектуальные датчики открывают путь к стратегическому переходу от традиционной затратной модели обслуживания «по регламенту» к более эффективной модели «по состоянию», что минимизирует простои и создает новые возможности для монетизации данных предиктивной аналитики. Для авиакомпаний ключевой рекомендацией является включение критериев совокупной стоимости владения (ТСО) и стоимости жизненного цикла (LCC) в процедуры закупки бортового оборудования. Для производителей же критически важно обосновывать цену высокоточных решений через прозрачную демонстрацию долгосрочной экономии для конечного заказчика — авиакомпаний. В заключение отметим, что проблема температурной стабильности эффективно решается лишь на стыке инженерии и экономики. Разработанная модель позволяет количественно оценить «цену неточности» и «цену безопасности», переводя технические аргументы в язык обоснованных бизнес-решений. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются интеграция подобных оценочных моделей в корпоративные системы планирования (ERP) и управления техническим обслуживанием (MRO), а также углубленный анализ экономики предиктивных моделей, основанных на данных от «умных» датчиков.

Список источников

1. Ануфриев, В. Методы обработки сигналов индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений / В. Ануфриев, А. Лужбинин, С. Шумилин // Современная электроника. – 2014. – № 4.
2. Мёрфи К. Выбор подходящего датчика для предиктивного технического обслуживания // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2020. – №. 9. – С. 200.

3. Петросянц, К. О. Моделирование датчиков температуры мощных интеллектуальных ИС / К. О. Петросянц, Н. И. Рябов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2010. – № 1. – С. 80–85.

4. Хамрокулов Ф. Х. и др. Анализ и оценка инвестиционных решений в компании: выпускная бакалаврская работа по направлению подготовки: 38.03. 01- Экономика. – 2024.

5. Ящун Т. В., Ильмушкина А. А., Кротов Е. Ю. Экономика и управление: проблемы, решения // экономика и управление. – 2025. – Т. 12. – №. 3. – С. 157-164.

Сведения об авторах

Мирзоев Артём Олимбекович, студент 1 курса, ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

Дуюнов Дмитрий Витальевич, студент 1 курса, ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

Сагитов Дамир Ильдарович, к.т.н., доцент кафедры «Систем автоматизированного управления», ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

Information about the authors

Mirzoev Artyom Olimbekovich, 1st year student, Novikov Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia

Dunov Dmitry Vitalievich, 1st year student, Novikov Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia

Sagitov Damir Ildarovich, Associate Professor of the Department of Automated Control Systems, Candidate of Technical Sciences, Novikov Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia