

УДК 656.7.025:629.7.07:681.5:004.942  
DOI 10.26118/2782-4586.2026.80.76.030

**Соколов Олег Аркадьевич**

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

**Пересунько Мария Сергеевна**

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

**Костина Тамара Александровна**

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

### **Технико-экономическое обоснование внедрения цифрового двойника и алгоритмов предиктивной диагностики системы автоматизированного управления самолета**

**Аннотация.** Рассматривается задача количественной оценки экономического эффекта от внедрения цифрового двойника и алгоритмов предиктивной диагностики для системы автоматического управления узкофюзеляжных воздушных судов. Актуальность обусловлена ростом доли затрат авиакомпании на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) и высокой стоимостью незапланированных отказов, приводящих к задержкам рейсов. Показано, что применение цифровых двойников на этапе эксплуатации сложной авиационной техники обеспечивает основу для перехода от регламентного технического обслуживания к обслуживанию по состоянию и продлению ресурса компонентов. В работе предложена методика расчета совокупной стоимости владения и чистого дисконтированного дохода для проекта внедрения цифрового двойника с учетом сокращения незапланированных замен, уменьшения задержек вследствие отказов, снижения прямых затрат на ТОиР.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, предиктивная диагностика, система автоматического управления, техническое обслуживание по состоянию, экономическая эффективность.

**Sokolov Oleg Arkadievich**

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov

**Peresunko Maria Sergeevna**

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov

**Kostina Tamara Alexandrovna**

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov

### **Technical and economic justification for the implementation of a digital twin and predictive diagnostics algorithms for an automated aircraft control system**

**Annotation.** The problem of quantifying the economic effect of the introduction of a digital twin and predictive diagnostic algorithms for the automatic control system of narrow-body aircraft is considered. The urgency is due to the growing share of the airline's maintenance and repair costs and the high cost of unplanned failures leading to flight delays. It is shown that the use of digital twins at the stage of operation of complex aviation equipment provides the basis for the transition from routine maintenance to maintenance on the condition and prolongation of the service life of components. The paper proposes a methodology for calculating the total cost of ownership and net

present value for a digital twin implementation project, taking into account the reduction of unplanned replacements, the reduction of delays due to failures, and the reduction of direct maintenance and repair costs.

**Keywords:** digital twin, predictive diagnostics, automatic control system, condition-based maintenance, and cost-effectiveness.

### **Введение.**

Цифровые двойники являются одним из ключевых инструментов цифровой трансформации высокотехнологичной промышленности и транспорта. В авиационной отрасли технологии цифровых двойников рассматриваются как средство интеграции данных на этапах жизненного цикла воздушного судна, включая эксплуатацию, с целью повышения надежности и продления ресурса узлов и систем [1–3]. В зарубежной практике цифровой двойник трактуется как динамическая виртуальная реплика изделия, непрерывно уточняемая по данным мониторинга, и используемая для прогнозирования деградации и оптимизации обслуживания [4].

Одним из наиболее экономически чувствительных направлений применения цифровых двойников является предиктивное техническое обслуживание. По данным IATA, использование ресурсосберегающего мониторинга и прогнозирования состояния способно обеспечить авиакомпаниям ежегодную экономию на ТОиР за счет сокращения незапланированных работ и повышения готовности парка [5]. Производители подчеркивают, что предиктивная диагностика переводит часть незапланированных работ в плановые, снижая число задержек и связанный с ними ущерб [6]. В публикациях также фиксируются типовые диапазоны эффекта: снижение затрат на обслуживание порядка 18–25 % и рост доступности на 5–15 % (сводные отраслевые оценки) [7], а при корректной интеграции систем мониторинга — снижение затрат до 30 % и повышение ресурса компонентов до 20 % [8].

В экономике эксплуатации воздушных судов затраты, вызванные техническими задержками, сопоставимы с прямыми расходами на обслуживание. Eurocontrol публикует стандартные входные значения для анализа затрат и выгоды (СВА), где средняя стоимость минуты задержки для авиакомпании на земле составляет десятки–сотни евро в зависимости от фазы и вида задержки [9], а совокупная стоимость сетевых задержек оценивается примерно в 127 евро за минуту АТФМ-задержки (цены 2023 года) [10]. При этом в 2024 году средняя задержка рейса в европейском регионе оставалась на уровне около 17,5 минуты, а реакционные задержки занимали около 46 % структуры задержек [11]. Следовательно, снижение даже небольшой доли технических задержек дает заметный финансовый результат, особенно для узкофюзеляжного парка, выполняющего высокочастотные полеты.

Анализ существующих работ показывает, что при наличии многочисленных исследований по техническому и организационному аспекту цифровых двойников, методики прямой увязки эффектов предиктивной диагностики систем автоматизированного управления (САУ) с расчетом ТСО (совокупной стоимости владения) и NPV (чистой приведенной стоимости) для авиакомпании описаны недостаточно полно и часто ограничиваются качественными выводами. Цель работы – предложить воспроизводимую экономическую методику и продемонстрировать ее на модельном примере узкофюзеляжного парка.

### **Основная часть.**

*Объект исследования.* Объектом исследования является проект внедрения цифрового двойника и предиктивной диагностики для компонентов САУ узкофюзеляжного ВС (например, вычислителя управления полетом, исполнительные приводы, датчиков угловых скоростей и акселерометров). САУ относится к критическим системам, для

которых характерны строгие требования надежности и значительные эксплуатационные последствия при отказах.

*Концепция цифрового двойника САУ.* Цифровой двойник САУ рассматривается как совокупность:

- 1) цифровой модели структуры и режимов работы САУ;
- 2) канала непрерывного обмена данными с бортовыми источниками;
- 3) алгоритмов диагностики и прогноза отказов;
- 4) модуля поддержки решений по планированию обслуживания.

*Экономическая модель проекта.* Совокупная стоимость владения цифровым двойником САУ за горизонт  $H$  (лет) представляется как:

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=1}^H \frac{OPEX_t + C_t^{\text{fail}} - S_t}{(1+r)^t}$$

где  $CAPEX$  – единовременные инвестиции,  $OPEX_t$  – ежегодные операционные затраты (ПО, облачная инфраструктура, аналитика, обучение),  $C_t^{\text{fail}}$  – ожидаемые затраты от отказов САУ при базовом подходе ТО,  $S_t$  – экономия от перехода к предиктивному обслуживанию,  $r$  – ставка дисконтирования.

Чистый дисконтированный доход:

$$NPV = -CAPEX + \sum_{t=1}^H \frac{B_t - OPEX_t}{(1+r)^t}$$

где  $B_t$  – ежегодные выгоды (экономия), определяемые как:

$$B_t = \Delta C_t^{\text{uns}} + \Delta C_t^{\text{dir}} + \Delta C_t^{\text{inv}}$$

$\Delta C_t^{\text{uns}}$  – экономия от сокращения незапланированных отказов и задержек,

$\Delta C_t^{\text{dir}}$  – снижение прямых затрат ТОиР по САУ,

$\Delta C_t^{\text{inv}}$  – экономия от оптимизации запасов ЗИП.

Оценка  $\Delta C_t^{\text{uns}}$  проводится через ожидание числа технических событий:

$$\Delta C_t^{\text{uns}} = N_{\text{ac}} \cdot \lambda_{\text{uns}} \cdot k_{\text{red}} \cdot (C_{\text{delay}} + C_{\text{aog}} + C_{\text{log}})$$

где  $N_{\text{ac}}$  – число ВС в парке,  $\lambda_{\text{uns}}$  – средняя частота незапланированных событий САУ на ВС в год,  $k_{\text{red}}$  – доля сокращения таких событий после внедрения цифрового двойника.

Стоимость задержки  $C_{\text{delay}}$  определяется по стандартным входным данным Eurocontrol для СВА, выраженным в евро за минуту задержки и зависящим от фазы (у земли/в воздухе) [9, 10].

Параметр  $k_{\text{red}}$  выбирается в пределах диапазона, подтвержденного отраслевой практикой и научными публикациями по предиктивному обслуживанию (примерно 0,18–0,30 по затратам и 0,05–0,15 по доступности) [7, 8].

*Исходные данные для моделирования.*

Рассмотрим парк  $N_{\text{ac}} = 25$  узкофюзеляжных ВС, эксплуатируемых на среднемагистральных линиях. Горизонт расчёта  $H = 5$  лет, ставка дисконтирования  $r = 10\%$ .

Базовая частота незапланированных событий, связанных с САУ:  $\lambda_{\text{uns}} = 1,5$  события на самолёт в год. Средняя задержка, вызванная одним событием, принимается 120 минут на земле. По данным Eurocontrol, стоимость минуты задержки у земли в стратегическом исчислении для авиакомпании составляет около 166 евро за минуту в составе всех задержек [9]. Дополнительно учитываются прямые логистические и трудовые издержки незапланированного события  $C_{\text{log}} = 8000$  евро.

Прямые годовые затраты на ТОиР компонентов САУ в базовом режиме принимаются  $C_{\text{base}}^{\text{dir}} = 120000$  евро на самолет. Это включает плановые работы, материалы, ремонты агрегатов и внутренние трудозатраты.

Эффекты внедрения цифрового двойника:

- сокращение незапланированных событий САУ на  $k_{\text{red}} = 0,30$  (выбор внутри диапазона 0,18–0,30, подтвержденного публикациями) [7, 8];
- снижение прямых затрат ТОиР САУ на 15 % за счёт перехода к обслуживанию по состоянию и продлению ресурса (консервативно относительно опубликованных значений до 30 %) [8].

*Инвестиции:*

- CAPEX на цифровой двойник и интеграцию мониторинга – 60000 евро на самолёт (датчики, лицензии, интеграция, обучение);
- OPEX – 8000 евро на самолёт в год (поддержка ПО, вычислительные ресурсы, аналитика).

*Расчет экономии.*

Стоимость одного незапланированного события:

$$C_{\text{event}} = 120 \cdot 166 + 8000 = 27\,920 \text{ евро.}$$

Годовые затраты на незапланированные события в базовом режиме:

$$C_{\text{base}}^{\text{uns}} = 25 \cdot 1,5 \cdot 27\,920 = 1,047 \text{ млн евро.}$$

Экономия от их сокращения:

$$\Delta C^{\text{uns}} = 0,30 \cdot 1,047 = 0,314 \text{ млн евро/год.}$$

Экономия прямых затрат ТОиР:

$$\Delta C^{\text{dir}} = 25 \cdot 120\,000 \cdot 0,15 = 0,450 \text{ млн евро/год.}$$

Совокупная годовая выгода:

$$B = 0,314 + 0,450 = 0,764 \text{ млн евро/год.}$$

Операционные затраты:

$$\text{OPEX} = 25 \cdot 8000 = 0,200 \text{ млн евро/год.}$$

Чистая годовая выгода:

$$B - \text{OPEX} = 0,564 \text{ млн евро/год.}$$

CAPEX проекта:

$$\text{CAPEX} = 25 \cdot 60\,000 = 1,5 \text{ млн евро.}$$

NPV за 5 лет:

$$\text{NPV} = -1,5 + \sum_{t=1}^5 \frac{0,564}{(1,1)^t} = 0,64 \text{ млн евро.}$$

Срок окупаемости:

$$T_{\text{pb}} \approx \frac{1,5}{0,564} = 2,7 \text{ года.}$$

## **Вывод**

Полученные оценки согласуются с диапазонами эффекта, приводимыми в отраслевых материалах и научных работах: сокращение затрат ТОиР на 18–25 % и рост доступности на 5–15 % при предиктивном обслуживании, а также потенциальное снижение затрат до 30 % при комплексной интеграции систем мониторинга состояния. Выбор консервативного 15-процентного снижения прямых затрат и 30-процентного сокращения незапланированных событий делает расчет пригодным как нижняя граница экономического результата.

Чувствительность модели показывает, что ключевыми драйверами NPV являются:

- частота отказов САУ;
- стоимость минуты задержки на сети маршрутов авиакомпании;
- уровень достигнутого сокращения незапланированных работ.

Для операторов с интенсивным суточным налетом и высокой загрузкой цепочки оборота ВС эффект будет выше.

С методической точки зрения предложенная схема позволяет корректно переносить результаты предиктивной диагностики в язык финансовых метрик авиакомпании. Это устраняет типичный разрыв между инженерными исследованиями цифровых двойников и задачами экономического планирования, отмечаемый в работах по цифровизации авиационной отрасли [1–3].

Ограничения исследования:

- часть исходных параметров (частота событий отказов и ремонта САУ и его элементов, прямые затраты, CAPEX/OPEX) зависит от конкретного типа ВС, конфигурации САУ и договоров с провайдером ТОиР;

- стоимость задержки вариативна по регионам и бизнес-модели перевозчика; в работе применены стандартные входные данные Eurocontrol [9,10].

- перспективы развития методики процесса сбора и анализа данных о компонентах и системах САУ воздушных судов для оценки их состояния и выявления потенциальных проблем и расширением модели на оптимизацию складов ЗИП и планирование трудовых ресурсов.

Предложена воспроизводимая методика оценки экономической эффективности внедрения цифрового двойника и предиктивной диагностики САУ на основе TCO/NPV. На модельном примере узкофюзеляжного парка показано, что даже при консервативных допущениях проект обеспечивает положительный NPV за 5-летний период и срок окупаемости около 2,7 года. Экономический эффект формируется за счет двух взаимодополняющих источников: сокращения незапланированных технических событий САУ и снижения прямых затрат ТОиР при переходе к обслуживанию по состоянию. Методика может использоваться авиакомпаниями для обоснования программ цифровизации эксплуатации и выбора приоритетных систем для внедрения цифровых двойников.

#### Список источников

1. Воробьев, В. Г. Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования : учебник для студентов высших учебных заведений по специальности 160903 "Техническая эксплуатация авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов" / В. Г. Воробьев, В. Д. Константинов ; В. Г. Воробьев, В. Д. Константинов ; Московский гос. технический ун-т гражданской авиации. – Москва : МГТУ ГА, 2010. – 446 с. – ISBN 978-5-86311-768-3. – EDN QNXDEF.

2. Чекрыжев, Н. В. Основы технического обслуживания воздушных судов : Учебное пособие / Н. В. Чекрыжев. – Самара : Самарский государственный аэрокосмический университет, 2015. – 84 с. – ISBN 978-5-7883-1032-9. – EDN WNNZQO.

3. Моисеев, С. Г. Оценка обеспечения и сохранения летной годности воздушных судов с учетом экономической эффективности их эксплуатации : специальность 05.22.14 "Эксплуатация воздушного транспорта" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Моисеев Сергей Геннадьевич, 2014. – 145 с. – EDN YPRAUF.

4. Цибулькинова, В. Ю. Инвестиционный анализ: Учебное пособие [Электронный ресурс] / В. Ю. Цибулькинова. — Томск: ТУСУР, 2015. — 142 с.

5. Борисов, А. И. Проектное финансирование в России. Проблемы и направления развития / А. И. Борисов, П. Р. Сватеев // Экономика. Бизнес. Банки. – 2019. – № 11(37). – С. 67-78. – EDN YOEFYS.

6. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. — М. : Российский институт стандартизации, 2021. — 10 с.

7. Ташкинов, А. Г. управление проектами с использованием концепции цифрового двойника в авиадвигателестроительном предприятии / А. Г. Ташкинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 74. – С. 83-95. – DOI 10.15593/2224-9982/2023.74.08. – EDN FAJILD.

8. Цифровые двойники - платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей / А. В. Сальников, М. В. Гордин, Ю. Н. Шмотин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 4(745). – С. 60-72. – DOI 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72. – EDN NNVKNU.

9. Виноградов, К. А. Опыт АО «ОДК» по внедрению технологий цифрового двойника при создании газотурбинных двигателей / К. А. Виноградов, А. С. Никулин, Ю. Н. Шмотин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 4. – С. 25-36. – DOI 10.18287/2541-7533-2023-22-4-25-36. – EDN BAMXSS.

10. Долгов, О. С. Проектирование модели технического обслуживания и ремонта воздушных судов с использованием искусственных нейронных сетей / О. С. Долгов, Б. Б. Сафоклов // Вестник Московского авиационного института. – 2022. – Т. 29, № 1. – С. 19-26. – DOI 10.34759/vst-2022-1-19-26. – EDN PUNVXE.

11. Бурый, А. С. Цифровые двойники как основа парадигмы развития прикладных информационных систем / А. С. Бурый // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2022. – № 6(70). – С. 24-32. – EDN QYXRBY.

12. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности : Краткий доклад (сентябрь 2019 года) / А. И. Боровков, А. А. Гамзикова, К. В. Кукушкин, Ю. А. Рябов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019. – 62 с. – ISBN 978-5-7422-6922-9. – EDN ELMCKN.

#### **Сведения об авторах**

**Соколов Олег Аркадьевич**, к.т.н, доцент, заведующий кафедрой № 13 "Систем автоматизированного управления", ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова», Санкт-Петербург, Россия

**Пересунько Мария Сергеевна**, студент 3 курса, у/г ЛЭГВС-23-01, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова», Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38, Россия

**Костина Тамара Александровна**, студент 3 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

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

**Sokolov Oleg Arkadievich**, PhD, Associate Professor, Head of Department No. 13, "Automated Control Systems", St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Marshal of Aviation A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia

**Peresunko Maria Sergeevna**, 3rd year student, LEGVS-23-01, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Marshal of Aviation A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia

**Kostina Tamara Alexandrovna**, 3rd year student, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia