

Ребницкая Инна Валерьяновна

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

Ровейн Рихард Иосифович

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

Спиридонов Владислав Юрьевич

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

Разработка модели экономической оценки предиктивного обслуживания светосигнального и аэродромного электротехнического оборудования с учетом критичности отказов и стоимости простоя

Аннотация. В работе рассматривается экономическая оценка предиктивного обслуживания светосигнального и аэродромного электротехнического оборудования. Актуальность темы определяется тем, что внеплановые отказы, простои, аварийные выезды и задержки восстановительных работ напрямую влияют на эксплуатационную устойчивость аэродрома, уровень затрат и организацию технического обслуживания. В исследовании предложена экономико-эксплуатационная модель, которая связывает прогностические признаки технического состояния оборудования с изменением частоты отказов, трудоемкости обслуживания, продолжительности простоев и итоговых денежных потоков с учетом критичности отдельных элементов инфраструктуры. Выполнен демонстрационный расчет, показавший, что внедрение предиктивного подхода способно обеспечить положительную чистую приведенную стоимость проекта при заданных условиях. Практическая значимость работы состоит в возможности использования предложенной модели для предварительного экономического обоснования цифрового мониторинга, выбора пилотного контура внедрения и сопоставления вариантов обслуживания по критерию ожидаемого эффекта.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, светосигнальное оборудование, аэродромное электротехническое оборудование, стоимость простоя, критичность отказов, экономическая эффективность, NPV, TCO

Rebnitzkaya Inna Valeryanovna

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

Rovein Richard Iosifovich

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

Spiridonov Vladislav Yurievich

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

Development of a Model for the Economic Evaluation of Predictive Maintenance of Airfield Lighting and Aerodrome Electrical Equipment Considering Failure Critically and Downtime Cost

Abstract. The paper examines the economic assessment of predictive maintenance for airfield lighting and aerodrome electrical equipment. The relevance of the topic is determined by the fact that unscheduled failures, downtime, emergency repair actions, and delays in restoration directly affect the operational stability of an aerodrome, the level of costs, and the organization of maintenance. The study proposes an economic and operational model that links predictive

indicators of technical condition with changes in failure frequency, maintenance labor intensity, downtime duration, and resulting cash flows, taking into account the criticality of individual infrastructure elements. A demonstration calculation was performed and showed that the implementation of a predictive approach can provide a positive net present value of the project under the specified conditions. The practical significance of the study lies in the possibility of using the proposed model for preliminary economic justification of digital monitoring, selection of a pilot implementation area, and comparison of maintenance options according to the expected effect.

Keywords: predictive maintenance, airfield lighting equipment, aerodrome electrical equipment, failure, downtime cost, equipment criticality, economic efficiency, NPV, TCO.

Светосигнальное и аэродромное электротехническое оборудование относится к числу инфраструктурных элементов, от состояния которых зависят эксплуатационная готовность аэродрома, устойчивость технологических процессов и допустимость выполнения операций в различных условиях [1-8]. Нарушения в работе огней светосигнальной системы, линий электропитания, шкафов управления, распределительных и коммутационных устройств приводят не только к локальной технической неисправности, но и к изменению режима эксплуатации, срочным восстановительным вмешательствам, росту нагрузки на персонал и дополнительным потерям, связанным с простоем и ограничением использования оборудования.

При реактивном подходе обслуживание выполняется после возникновения отказа, вследствие чего растет доля внеплановых работ, ухудшается предсказуемость затрат и увеличивается стоимость вмешательств. Существенная часть расходов при этом формируется не столько стоимостью ремонта, сколько сопутствующими потерями времени и последствиями простоя. Вместе с тем в существующей практике результаты контроля и прогноза состояния оборудования часто не переводятся в строгую экономическую оценку, а решение о внедрении цифрового мониторинга принимается без количественной увязки технических изменений с финансовым результатом.

Целью работы является разработка модели экономической оценки предиктивного обслуживания светосигнального и аэродромного электротехнического оборудования на основе связи между прогностическими показателями технического состояния, критичностью отказов и денежными последствиями простоев. Научная новизна состоит в формализации перехода от прогностических признаков деградации к изменению частоты отказов, трудоемкости, длительности простоя и итоговых показателей эффективности проекта с учетом критичности оборудования. Практическая значимость работы заключается в возможности использования модели для предварительного инвестиционного обоснования внедрения предиктивного обслуживания и выбора наиболее целесообразного пилотного контура.

1. Объект и логика предиктивного обслуживания

В рассматриваемый контур включаются огни светосигнальной системы, кабельные линии и соединительные элементы, регуляторы яркости, шкафы питания, распределительные устройства, коммутационные элементы и вспомогательные узлы, от которых зависит устойчивость работы системы в целом [1-8]. Экономически значимым является именно весь контур, поскольку отказ внешне малого элемента может быть следствием более глубокой проблемы в линии питания, коммутации или распределительном узле.

Для данного класса оборудования характерны отказ отдельного светосигнального элемента, нарушение работы кабельной линии, сбой в шкафу питания, отказ регулятора яркости, нарушение коммутации, деградация электрических параметров и повторяющиеся нестабильные режимы работы [2; 3; 6-8]. Практический интерес представляют не только сами отказы, но и признаки, предшествующие им: повторяемость сбоев, ухудшение параметров, рост частоты мелких неисправностей, сокращение интервала между

вмешательствами [3; 6]. Именно они образуют информационную основу предиктивного обслуживания.

Предиктивное обслуживание в данной работе понимается как последовательность операций, включающая сбор эксплуатационных данных, выявление отклонений, оценку риска отказа, формирование предупреждения и назначение планового вмешательства. Его экономический смысл состоит в том, что часть работ переносится из аварийной зоны в плановую, что уменьшает число внеплановых выездов, трудоемкость срочных восстановительных мероприятий и потери от простоя. Применение такого подхода особенно оправдано для оборудования, отказ которого связан с существенными эксплуатационными ограничениями и высокой стоимостью времени.

2. Методика экономической оценки

Экономическая оценка строится как переход от признаков ухудшения технического состояния к стоимостной оценке последствий отказов и итоговым показателям проекта. Вводятся следующие параметры: N – количество единиц оборудования, λ – средняя частота отказов, C_m – материальные затраты на одно событие, L – трудоемкость одного события, C_l – стоимость одного человеко-часа, T_d – длительность простоя на одно событие, C_d – стоимость часа простоя, I_0 – начальные инвестиции, $OPEX$ – ежегодные эксплуатационные затраты, r – ставка дисконтирования, T – горизонт расчета, w_i – коэффициент критичности для i -й группы оборудования.

Стоимость одного отказного события определяется как сумма материальных затрат, трудовых затрат и потерь от простоя:

$$C_{\text{событ}} = C_m + L \cdot C_l + T_d \cdot C_d$$

Для учета различий в тяжести последствий вводится коэффициент критичности, и приведенная стоимость события для i -й группы записывается в виде

$$C_i = w_i(C_{m,i} + L_i \cdot C_{l,i} + T_{d,i} \cdot C_{d,i})$$

До внедрения предиктивного обслуживания ожидаемое число отказов за год определяется как

$$n_i^{(0)} = N_i \lambda_i$$

а суммарные годовые затраты как

$$Z^{(0)} = \sum_{i=1}^m n_i^{(0)} C_i$$

Эффект внедрения описывается четырьмя коэффициентами: k_1 – снижение частоты отказов, k_2 – сокращение трудоемкости, k_3 – сокращение длительности простоя, k_4 – снижение материальных затрат. После внедрения:

$$n_i^{(1)} = N_i \lambda_i (1 - k_{1,i})$$

$$C_i^{(1)} = w_i [C_{m,i} (1 - k_{4,i}) + L_i (1 - k_{2,i}) C_{l,i} + T_{d,i} (1 - k_{3,i}) C_{d,i}]$$

$$Z^{(1)} = \sum_{i=1}^m n_i^{(1)} C_i^{(1)}$$

Годовой валовой экономический эффект определяется как

$$E_{\text{вал}} = Z^{(0)} - Z^{(1)}$$

а чистый денежный поток:

$$CF_t = E_{\text{вал}} - OPEX$$

Для итоговой оценки используются показатели чистой приведенной стоимости и общей стоимости владения:

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

$$TCO = I_0 + \sum_{t=1}^T (OPEX_t + Z_t^{(1)})$$

Предлагаемая модель имеет экономико-эксплуатационный характер и не описывает физику деградации каждого узла с полной точностью. Ее задача состоит в переводе результатов наблюдения за состоянием оборудования и статистики отказов в систему показателей, пригодных для оценки экономической целесообразности внедрения.

3. Демонстрационный расчет и анализ чувствительности

Для демонстрационного расчета рассматривается укрупненный контур, включающий огни светосигнальной системы, кабельные линии, регуляторы яркости, шкафы питания и распределительно-коммутационные узлы. Приняты следующие исходные данные: $N = 120$ ед., $\lambda = 0,18$ события на единицу оборудования в год, $C_m = 95\,000$ руб., $L = 14$ чел.-ч, $C_l = 2\,800$ руб./чел.-ч, $T_d = 6$ ч, $C_d = 180\,000$ руб./ч, $w = 1,35$, $I_0 = 24,0$ млн руб., $OPEX = 3,2$ млн руб./год, горизонт расчета $T = 5$ лет, ставка дисконтирования $r = 12\%$. Для базового сценария принято: $k_1 = 0,30$, $k_2 = 0,20$, $k_3 = 0,25$, $k_4 = 0,10$.

В исходном состоянии ожидаемое число отказов составляет 21,6 события в год, приведенная стоимость одного события – 1,639,170 руб., а суммарные годовые затраты – 35,406,072 руб. После внедрения предиктивного обслуживания число отказов снижается до 15,12 события, стоимость одного события – до 1,25,261 руб., а годовые затраты – до 18,919,066 руб. Валовой годовой эффект составляет 16,487,006 руб., чистый годовой денежный поток после учета OPEX – 13,287,006 руб.

Чистая приведенная стоимость проекта на горизонте 5 лет составляет 23,896,682 руб., а срок окупаемости по накопленному дисконтированному потоку – около 2,2 года. Это означает, что при принятых параметрах внедрение предиктивного обслуживания экономически оправдано. Наибольший вклад в полученный эффект дает сокращение потерь от простоя, а не снижение стоимости материалов, что указывает на ключевую роль времени в экономике рассматриваемого контура.

Анализ чувствительности показывает, что проект особенно чувствителен к коэффициенту снижения частоты отказов и стоимости часа простоя. При базовой конфигурации модель остается экономически оправданной уже при снижении частоты отказов примерно на 5,5%. Пороговое значение стоимости часа простоя, при котором NPV остается положительным, составляет около 100,2 тыс. руб./ч. Предельный уровень начальных инвестиций находится вблизи 47,9 млн руб. При превышении этого значения проект теряет экономическую привлекательность.

Таблица 1

Исходные данные и ключевые результаты демонстрационного расчета

Показатель	Значение до внедрения	Значение после внедрения / результат
Количество единиц оборудования	120 ед.	120 ед.
Частота отказов	0,18 событий/ед. в год	0,126 событий/ед. в год
Число отказовых событий в год	21,60	15,12
Стоимость одного события	1 639 170 руб.	1 251 261 руб.
Годовые затраты	35 406 072 руб.	18 919 066 руб.
Валовой экономический эффект	—	16 487 006 руб./год

Чистый денежный поток	—	13 287 006 руб./год
NPV	—	23 896 682 руб.
ТСО за 5 лет	177 030 360 руб.	134 595 332 руб.
Срок окупаемости	—	2,2 года

Рис. 1 показывает накопленный дисконтированный денежный поток проекта по годам и момент выхода в положительную область.

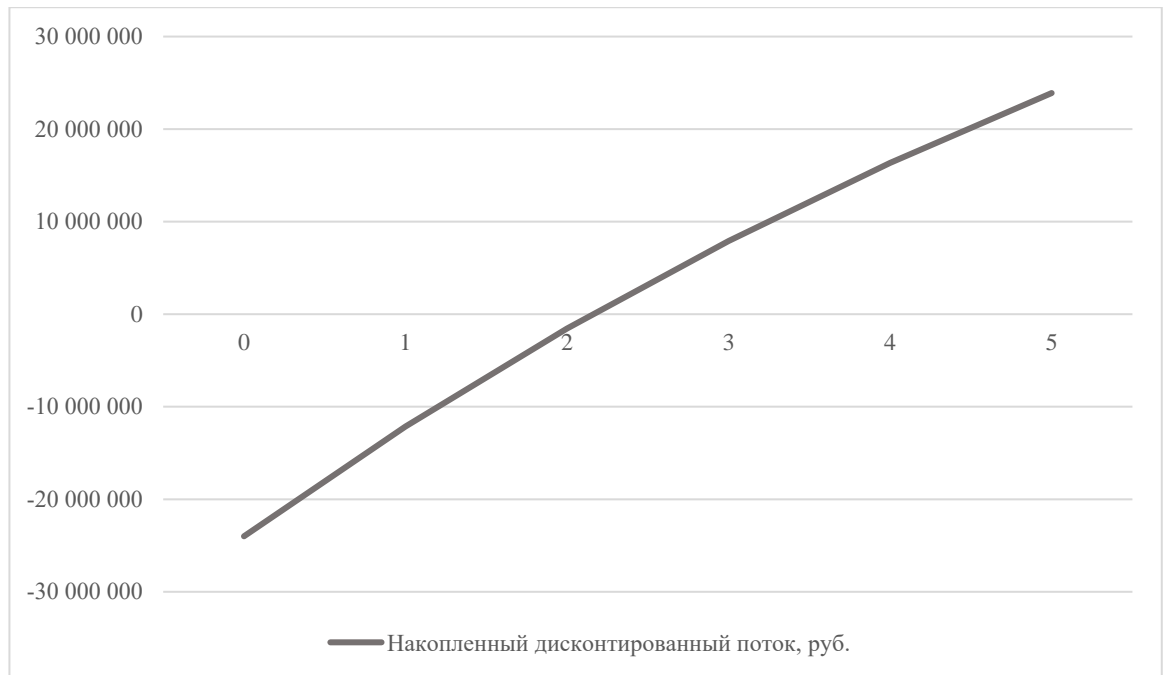


Рис. 1 – Накопленный дисконтированный денежный поток проекта по годам

Заключение

Разработана экономико-эксплуатационная модель оценки предиктивного обслуживания светосигнального и аэродромного электротехнического оборудования, связывающая прогностические признаки технического состояния с изменением частоты отказов, трудоемкости, длительности простоя и итоговых показателей эффективности проекта. Демонстрационный расчет подтвердил возможность получения положительного экономического результата при наличии выраженного эффекта по снижению отказов и высокой стоимости простоя. Практическая ценность модели состоит в возможности ее применения для предварительного инвестиционного обоснования, выбора пилотного контура внедрения и сопоставления вариантов цифровизации аэродромной службы.

Список источников

1. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 25 августа 2015 г. № 262 «Об утверждении Федеральных авиационных правил “Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов”». — 176 с. — Текст: электронный. — URL: <https://favt.gov.ru/public/materials//0/e/f/8/6/0ef86a2adb936e3fb9c9f18321f6da67.pdf> (дата обращения: 09.04.2026).
2. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 16 ноября 2023 г. № 381 «Об утверждении Федеральных авиационных правил “Требования к светосигнальному и метеорологическому оборудованию, устанавливаемому на сертифицированных аэродромах, предназначенных для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских

воздушных судов»». — 102 с. — Текст: электронный. — URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/e/f/9/8/7/ef9877bfc83b2c1bb15b0c060aacff4.pdf> (дата обращения: 09.04.2026).

3. Руководство по электросветотехническому обеспечению полетов в гражданской авиации Российской Федерации (РУЭСТОП ГА-95). — Москва, 1995. — 96 с. — Текст : электронный. — URL: https://tdmegaprom.ru/uploads/images/ruestop_ga_95.pdf (дата обращения: 09.04.2026).

4. Гражданские аэродромы / под ред. В. Н. Иванова. — Москва : Воздушный транспорт, 2005. — 280 с. — ISBN 5-88821-059-5. — Текст : электронный. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002694950> (дата обращения: 09.04.2026).

5. Юмахин Д. Ю. Электросветотехническое обеспечение безопасности полетов гражданской авиации. — Текст: электронный // Вестник Оренбургского государственного университета. — 2012. — № 9(145). — С. 168-170. — URL: https://vestnik.osu.ru/2012_9/29.pdf (дата обращения: 09.04.2026).

6. AC 150/5340-26C. Maintenance of Airport Visual Aid Facilities. — Washington, DC : Federal Aviation Administration, 2014. — 144 p. — Text : electronic. — URL: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/150-5340-26c.pdf (дата обращения: 09.04.2026).

7. International Civil Aviation Organization. Aerodrome Design Manual. Part 4: Visual Aids. — 5th ed. — Montreal : ICAO, 2021. — Text : electronic. — URL: <https://store.icao.int/en/aerodrome-design-manual-part-4-visual-aids-doc-9157-part-4> (дата обращения: 09.04.2026).

8. International Civil Aviation Organization. Aerodrome Design Manual. Part 5: Electrical Systems. — 2nd ed. — Montreal : ICAO, 2017. — Text : electronic. — URL: <https://store.icao.int/en/aerodrome-design-manual-part-5-electrical-systems-doc-9157-part-5> (дата обращения: 09.04.2026).

Сведения об авторах

Ребницкая Инна Валерьяновна, старший преподаватель кафедры №8 «Прикладной математики и информатики», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

Ровейн Рихард Иосифович, студент 1 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Спиридонов Владислав Юрьевич, студент 1 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Rebnitzkaya Inna Valerianovna, 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

Rovein Richard Iosifovich, 1st year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Spiridonov Vladislav Yurievich, 1st year student, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia.