

Сагитов Дамир Ильдарович

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

Ерёмина Екатерина Вячеславовна

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

Китаева Татьяна Михайловна

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

**Разработка экономической модели предиктивного обслуживания аэродромного
электро- и светотехнического оборудования с учетом степени критичности отказов**

Аннотация. В статье рассмотрена задача экономической оценки предиктивного обслуживания аэродромного электросветотехнического оборудования. Проблема связана с тем, что расходы аэропорта на поддержание светосигнальной системы складываются не только из оплаты электроэнергии и плановых работ, но и из затрат на поиск неисправностей, аварийное восстановление, простой отдельных элементов инфраструктуры и поддержание резервного питания. Цель работы состоит в разработке расчетной модели, позволяющей сравнить реактивный, плановый и предиктивный варианты обслуживания с учетом критичности отказов. В качестве метода использованы расчет эксплуатационных затрат, индекс критичности отказа и сравнение годового экономического эффекта. Предложены формулы совокупных затрат, затрат на электроэнергию, ожидаемых потерь от отказов, индекса критичности и срока окупаемости внедрения средств контроля состояния. Приведен демонстрационный расчет для условного регионального аэропорта. Показано, что предиктивный вариант может быть экономически рациональным, если снижение аварийных выездов и простоев превышает дополнительные расходы на средства контроля и обработку данных.

Ключевые слова: электрооборудование, электроника, экономика, аэродром, светотехническое оборудование, светосигнальная система, предиктивное обслуживание, эксплуатационные расходы, отказ, простой, экономический эффект.

Sagitov Damir Ilydarovich

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

Eryomina Ekaterina Vyacheslavovna

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

Kitaeva Tatyana Mikhailovna

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

**Economic Model of Predictive Maintenance for Aerodrome Electrical Lighting Equipment
Considering Failure Criticality**

Abstract. The article considers the economic assessment of predictive maintenance for aerodrome electrical lighting equipment. The problem is that airport expenses for maintaining the airfield lighting system include not only electricity costs and scheduled maintenance, but also the costs of fault detection, emergency repair, downtime of individual infrastructure elements,

and standby power supply. The aim of the paper is to develop a calculation model that makes it possible to compare reactive, scheduled, and predictive maintenance options while taking failure criticality into account. The method includes the calculation of operating costs, the use of a failure criticality index, and comparison of the annual economic effect. The paper proposes formulas for total operating costs, electricity costs, expected losses from failures, the criticality index, and the payback period for introducing equipment condition control tools. A demonstration calculation is provided for a notional regional airport. It is shown that the predictive maintenance option may be economically reasonable if the reduction in emergency repairs and downtime exceeds the additional costs of condition control tools and data processing.

Keywords: airport, aerodrome lighting equipment, electrical lighting equipment, operating costs, ALCMS, LED, cost optimization.

Введение

Электрооборудование и светотехническое оборудование аэродрома относится к элементам инфраструктуры, которые обычно не видны пассажиру, но, конечно, напрямую влияют на возможность выполнения полетов в темное время суток и при ограниченной видимости. В состав подобных систем обычно входят, например, огни взлетно-посадочной полосы (ВПП – далее), огни рулежных дорожек (РД – далее), световые указатели, кабельные линии, регуляторы яркости, шкафы управления, устройства резервного электропитания и средства контроля состояния и т.д. [1, 2]. Конечно, нормативные документы с требованиями к аэродромам закрепляют необходимость поддержания такой инфраструктуры в исправном состоянии [3].

Рассмотрим светосигнальную систему. Сложность ее эксплуатации (в экономической части) состоит в том, что, она требует постоянной готовности даже тогда, когда интенсивность полетов меняется. Снижение числа рейсов не означает пропорционального снижения расходов. Часть оборудования должна оставаться работоспособной, персонал должен иметь возможность быстро обнаружить неисправность, а резервное питание должно быть готово к экстренному включению. Поэтому экономия только за счет уменьшения числа включенных огней может оказаться ложной, если она приводит к росту риска отказа или увеличивает время восстановления системы.

В традиционной схеме обслуживания основное внимание уделяется плановым проверкам и устранению отказов после их обнаружения. Подход прост, однако он не всегда позволяет заранее обнаружить признаки ухудшения технического состояния кабельных линий, световых приборов, регуляторов яркости или источников питания.

В зарубежных руководствах по обслуживанию средств аэропорта внимание уделено профилактическим работам, регулярным проверкам и контролю надежности оборудования [5, 6]. Для светодиодного аэродромного освещения отдельно отмечается, что эксплуатационный эффект зависит как от меньшего энергопотребления, так и от организации обслуживания самим персоналом, диагностики и подготовки персонала [7].

Цель статьи – разработка простой расчетной модели, позволяющей сравнить разные варианты обслуживания аэродромного электро-светотехнического оборудования по годовому уровню затрат.

В нашей работе предлагается связать расходы со степенью критичности отказов, вероятностью возникновения неисправностей, стоимостью восстановления и возможными потерями от простоя оборудования.

Научная новизна: подход позволяет заранее оценить, при каких условиях установка средств контроля состояния и переход к обслуживанию по фактическому состоянию становятся экономически оправданными.

Материалы и методы

Рассмотрим электро-светотехнический комплекс условного регионального аэропорта с одной ВПП и одной основной РД.

В модель включены **четыре** группы оборудования: *световые средства взлетно-посадочной полосы, световые средства рулежных дорожек, оборудование электропитания и регулирования яркости, средства контроля и резервного электропитания*. Разделение элементов по группам приведено в табл. 1.

Таблица 1

Группы оборудования и возможные последствия отказа

Группа оборудования	Примеры элементов	Возможные последствия отказа	Уровень влияния
Огни ВПП	Входные, осевые, боковые и ограничительные огни	Ограничение или невозможность посадки в заданных условиях	Высокий
Огни РД	Боковые и осевые огни, световые указатели	Замедление руления, увеличение времени освобождения полосы	Средний
Электропитание и регулирование	Кабельные линии, регуляторы яркости, шкафы управления	Потеря части системы или невозможность выбора нужного режима яркости	Высокий
Контроль и резерв	Система контроля состояния, резервные источники питания	Увеличение времени поиска неисправности, снижение готовности к восстановлению	Средний или высокий

Расчет выполняется для **трех** вариантов обслуживания. Первый вариант – «реактивный»: неисправность устраняется после обнаружения отказа. Второй вариант – «плановый»: работы проводятся по фиксированному графику независимо от фактического состояния элементов. Третий вариант – «предиктивный»: часть решений принимается по данным контроля состояния оборудования: числу отказов и повторных замечаний по каждой группе светосигнальных средств, результатам измерения сопротивления изоляции кабельных линий, току и напряжению в последовательных цепях огней, отклонению яркости световых приборов от нормативного уровня, состоянию регуляторов яркости, срабатываниям автоматического ввода резерва, времени работы резервных источников питания, а также записям в журналах технического обслуживания.

Совокупные эксплуатационные затраты за год определяются по формуле:

$$Z = C_{el} + C_{plan} + C_{fail} + C_{idle} + C_{mon} \quad (1)$$

где Z – годовые эксплуатационные затраты, каждая часть измеряется в данном случае в рублях (руб.), C_{el} – затраты на электроэнергию, C_{plan} – затраты на плановое обслуживание, C_{fail} – ожидаемые затраты на устранение отказов, C_{idle} – ожидаемые потери, связанные с простоем или ограничением работы системы, C_{mon} – затраты на средства контроля состояния и обработку данных.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по выражению:

$$C_{el} = c_e \sum_{i=1}^m P_i \cdot t_i \cdot k_i \quad (2)$$

где c_e – тариф на электроэнергию, руб./кВт*ч, P_i – установленная мощность оборудования i -й группы, кВт, t_i – время работы этой группы за расчетный период, ч., k_i – коэффициент использования оборудования, m – число групп оборудования, ед.

k_i – это **коэффициент использования оборудования i -й группы**, то есть доля фактической работы оборудования относительно штатного режима.

Он **безразмерный**, измеряется в **долях единицы**:

- $k_i = 1$ – оборудование работает в полном штатном режиме,
- $k_i = 0,7$ – оборудование используется примерно на 70% от штатного режима,
- $k_i = 0$ – оборудование не работает в расчетном периоде.

В формуле затрат на электроэнергию он нужен, чтобы не считать, как будто все огни, регуляторы и цепи работают постоянно на полной мощности.

Ожидаемые затраты на отказ для i -й группы оборудования определяются как произведение вероятности отказа на сумму прямых затрат на восстановление и потерь от простоя:

$$C_{fail,i} = p_i \cdot (C_{rep,i} + C_{idle,i}) \quad (3)$$

где p_i – вероятность отказа оборудования i -й группы за расчетный период, $C_{rep,i}$ – средняя стоимость восстановления, $C_{idle,i}$ – потери от ограничения работы системы или простоя, связанные с отказом этой группы.

Для учета различной «значимости» отказов введем индекс критичности:

$$K_i = p_i \cdot q_i \cdot d_i \quad (4)$$

где K_i – **индекс критичности отказа**, p_i – вероятность отказа оборудования i -й группы за расчетный период, доли единицы. Определить можно по журналам отказов и технического обслуживания либо предварительно задается экспертно при отсутствии достаточной статистики, q_i – коэффициент влияния отказа на выполнение полетов, безразмерная величина, отражающая значимость данной группы оборудования для использования аэродрома, d_i – коэффициент сложности восстановления, безразмерная величина, учитывающая трудоемкость ремонта, доступность запасных частей, необходимость выезда бригады и время проверки оборудования после восстановления.

Чем выше значение K_i , тем выше приоритет контроля и профилактики данной группы оборудования.

Годовой экономический эффект от перехода к обслуживанию такого вида можно определить как разность затрат базового и предлагаемого вариантов:

$$E = Z_{base} - Z_{pred} \quad (5)$$

где E – годовой экономический эффект, руб., Z_{base} – затраты при базовом варианте обслуживания, Z_{pred} – затраты при предиктивном варианте обслуживания.

Если для внедрения контроля состояния требуются начальные вложения I_0 , то срок окупаемости определим по формуле:

$$T_{pay} = \frac{I_0}{E} \quad (6)$$

где T_{pay} – срок окупаемости, в годах, I_0 – первоначальные затраты на внедрение средств контроля состояния, E – годовой экономический эффект. Формула применима только при $E > 0$. Если $E \leq 0$, переход к предиктивному варианту в заданных условиях экономически не подтверждается.

Логика расчета показана на рис. 1. Сначала определяется состав оборудования, затем оцениваются вероятность отказа, влияние отказа на работу аэродрома и стоимость восстановления. После этого рассчитываются затраты по каждому варианту обслуживания и выбирается вариант с меньшими годовыми расходами при сохранении требуемого уровня готовности.

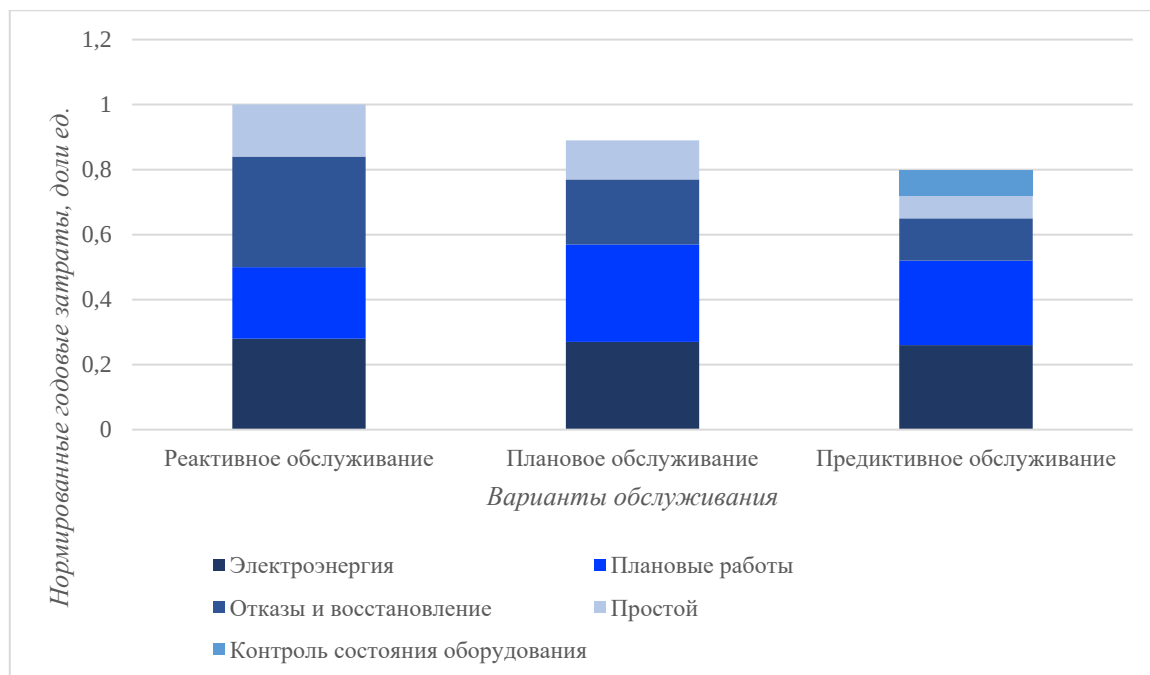


Рис. 1 – Сравнение структуры расходов по вариантам обслуживания

Результаты

Для демонстрации работы модели принят условный пример регионального аэропорта. Численные значения не являются фактическими данными конкретного аэропорта и используются только для показа логики расчета.

Исходные параметры приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры демонстрационного расчета

Показатель	Реактивный вариант	Плановый вариант	Предиктивный вариант
Доля оборудования под постоянным контролем, доли ед.	0,20	0,45	0,85
Годовые затраты на электроэнергию, доли ед.	0,28	0,27	0,26
Затраты на плановое обслуживание, доли ед.	0,22	0,30	0,26
Ожидаемые затраты на отказы, доли ед.	0,34	0,20	0,13
Потери от простоя или ограничения работы, доли ед.	0,16	0,12	0,07
Затраты на контроль состояния, доли ед.	0,00	0,00	0,08

Из табл. 2 видно, что реактивный вариант имеет наименьшие прямые затраты на организацию обслуживания, но проигрывает по ожидаемым потерям от отказов. Плановый вариант уменьшает аварийные затраты, но требует большего объема регулярных работ. Предиктивный вариант добавляет расходы на контроль состояния, но снижает ожидаемые затраты на отказы и простой.

Для оценки устойчивости расчетной модели выполнено сравнение влияния основных параметров на итоговые годовые расходы. Каждый параметр условно изменялся на 20%, после чего фиксировалось изменение суммарных затрат.

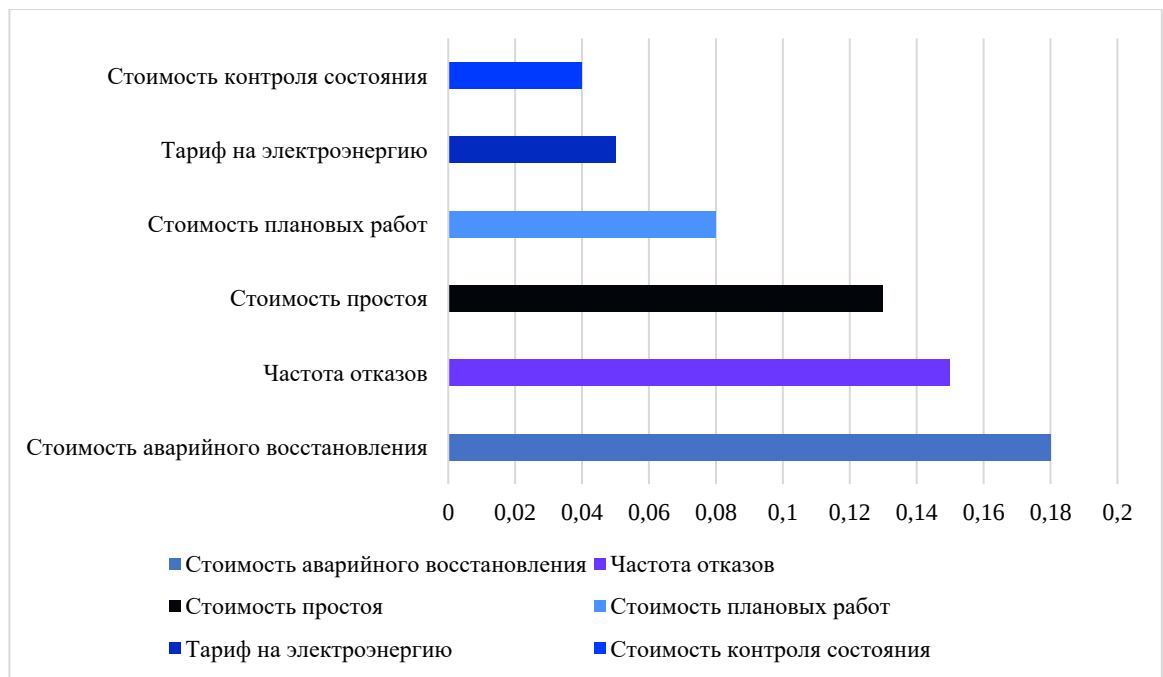


Рис. 2 – Сравнение влияния параметров на годовые расходы

Из рис. 2 видно, что наибольшее влияние на результат оказывают стоимость аварийного восстановления, частота отказов и стоимость простоя оборудования. Вывод: при применении модели эти параметры должны уточняться **в первую очередь** по данным эксплуатации и журналам технического обслуживания.

Сравнение итоговых результатов приведено в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение вариантов обслуживания

Вариант обслуживания	Суммарные годовые затраты Z, доли ед.	Экономия к реактивному варианту, %	Индекс готовности, доли ед.	Вывод
Реактивный	1,00	0	0,88	Минимум предварительных расходов, но высокий риск отказов
Плановый	0,89	11	0,93	Снижение аварийных расходов при росте плановых работ
Предиктивный	0,80	20	0,96	Наиболее выгодный вариант в принятом расчете

Предиктивный вариант дает наименьшие суммарные расходы – 0,80 от базового уровня. Экономия по сравнению с реактивным обслуживанием составляет около 20%. Основной источник эффекта – уменьшение аварийных затрат и потерь от простоя. При этом расходы на контроль состояния не исчезают, но в принятом расчете они меньше, чем предотвращенные потери.

Полученный результат не означает, что предложенное «предиктивное» обслуживание всегда является лучшим решением. Для небольшого аэродрома с малой интенсивностью полетов и низкой стоимостью простоя внедрение сложных средств контроля может оказаться абсолютно невыгодным. Наиболее рациональным оно становится для оборудования с высоким индексом критичности K_i , то есть там, где отказ быстро влияет на возможность выполнения полетов или требует дорогого восстановления.

На практике предложенную модель можно использовать для составления списка групп оборудования и последующего ранжирования. Например, для огней ВПП и цепей электропитания значение q_i будет выше, чем для части вспомогательных световых указателей.

Средства контроля состояния в первую очередь следует устанавливать на тех элементах, отказ которых может привести к ограничению работы аэродрома или заметному росту затрат на восстановление.

Заключение

В статье предложена экономическая модель предиктивного обслуживания аэродромного электро-светотехнического оборудования. Модель связывает годовые затраты с расходами на электроэнергию, плановое обслуживание, устранение отказов, возможный простой и работу средств контроля состояния.

Ценность модели состоит в том, что она позволяет сравнивать предложенные реактивный, плановый и предиктивный варианты обслуживания **по ожидаемым потерям от отказов**. Введен индекс критичности отказа, учитывающий вероятность неисправности, влияние на выполнение полетов и сложность восстановления.

Расчет показал, что в принятых условиях предиктивное обслуживание снижает нормированные годовые затраты с 1,00 до примерно 0,80 и повышает расчетную готовность системы. Результат достигается за счет более раннего выявления неисправностей и уменьшения числа аварийных работ.

Окончательное решение о внедрении подобной системы должно приниматься после получения исходных данных по определенному аэропорту: *состава оборудования, тарифов, стоимости выездов, статистики отказов и требований к готовности светосигнальной системы*.

Список источников

1. Аронов О. Н. Светотехническое оборудование аэродромов : метод. указания по изучению дисциплины. - Ульяновск : УБАУ ГА(И), 2009. - 27 с. - URL: https://lib.laop.ulstu.ru/venec/2015/Aronov_4.pdf (дата обращения: 02.04.2026).
2. Булыгин Р. С. Электросветотехническое оборудование аэродромов : методические указания по изучению дисциплины и выполнению контрольной работы. - Санкт-Петербург : Университет ГА, 2018. - 13 с. - URL: https://spbguga.ru/files/2018/ZF/Metod_materiali/Elektrosvetoteh_oborudov_aerodromov.pdf (дата обращения: 02.04.2026).
3. Об утверждении Федеральных авиационных правил «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов» : приказ Минтранса России от 25.08.2015 № 262. - URL: <https://favt.gov.ru/public/materials//0/e/f/8/6/0ef86a2adb936e3fb9c9f18321f6da67.pdf> (дата обращения: 02.04.2026).
4. Доклад о результатах деятельности Минтранса России за 2024 год, целях и задачах на 2025 год и плановый период до 2027 года. - Москва, 2025. - URL: <https://mintrans.gov.ru/file/529090> (дата обращения: 02.04.2026).
5. FAA Advisory Circular 150/5340-26C. Maintenance of Airport Visual Aid Facilities. - Washington, DC : Federal Aviation Administration, 2014. - URL: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/150-5340-26c.pdf (date of access: 02.04.2026).

6. ICAO. Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation. Aerodromes. Vol. 1. Aerodrome Design and Operations. - 8th ed. - Montreal : ICAO, 2018. - URL: https://www.iacm.gov.mz/app/uploads/2018/12/an_14_v1_Aerodromes_8ed._2018_rev.14_01.07.18.pdf (date of access: 02.04.2026).
7. ACRP Report 148: LED Airfield Lighting System Operation and Maintenance. - Washington, DC : Transportation Research Board, 2015. - 90 p. - URL: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3524.pdf> (date of access: 02.04.2026).

Сведения об авторах

Сагитов Дамир Ильдарович, кандидат технических наук, доцент кафедры №13 «Систем автоматизированного управления», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

Ерёмина Екатерина Вячеславовна, студент 2 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Китаева Татьяна Михайловна, студент 2 курса, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

Information about the authors

Sagitov Damir Ilydarovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department No. 13 'Automated Control Systems', Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia

Eryomina Ekaterina Vyacheslavovna, 2nd year student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia.

Kitaeva Tatyana Mikhailovna, 2nd year student, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia.