

В.В. Арсеньев¹, И.В. Брякин²

¹Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи,
г. Алматы, Республика Казахстан

²Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР
г. Бишкек, Республика Кыргызстан

СОВРЕМЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ СВЕТОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВЗЛЁТНО-ПОСАДОЧНЫХ ПОЛОС: ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Аннотация. В статье выполнен комплексный анализ современных комплексов светотехнического оборудования взлётно-посадочных полос аэродромов гражданской авиации как объектов автоматизированного управления. Рассмотрены требования международных нормативных документов к построению и функционированию систем управления светосигнальным оборудованием, исследованы особенности их эксплуатации в климатических условиях Республики Казахстан и выявлены основные ограничения существующих технических решений. Обоснованы перспективные направления модернизации комплексов светотехнического оборудования, предусматривающие внедрение светодиодных источников света, распределённых систем мониторинга технического состояния оборудования и беспроводных технологий передачи данных для решения задач диагностики и удалённого мониторинга. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и модернизации автоматизированных систем управления светотехническим оборудованием аэродромов гражданской авиации.

Ключевые слова: светотехническое оборудование; аэродром; взлётно-посадочная полоса; автоматизированная система управления; безопасность полётов; светосигнальное оборудование; светодиодные технологии; распределённый мониторинг; LoRa.

Введение

Безопасность полётов является одним из ключевых требований к функционированию системы воздушного транспорта и во многом определяется уровнем технического оснащения аэродромов. Несмотря на широкое внедрение спутниковой навигации, автоматизированных систем управления полётом и современных бортовых средств навигации, этапы захода на посадку, приземления и пробега воздушного судна по взлётно-посадочной полосе остаются наиболее ответственными фазами полёта, характеризующимися повышенной вероятностью возникновения авиационных происшествий. В условиях ограниченной видимости решающее значение приобретает надёжная работа комплексов светотехнического оборудования взлётно-посадочных полос (КСО ВПП), обеспечивающих экипаж воздушного судна необходимой визуальной информацией для безопасного выполнения взлётно-посадочных операций в соответствии с требованиями Международной организации гражданской авиации (ИКАО) [1–3].

Современный этап развития аэродромных светосигнальных систем характеризуется переходом от традиционных систем освещения к интеллектуальным автоматизированным комплексам, включающим энергоэффективные светодиодные источники света, программируемые средства управления, распределённые системы диагностики и технологии дистанционного мониторинга технического состояния оборудования [11, 14–16]. Использование подобных решений позволяет повысить эксплуатационную надёжность КСО ВПП, сократить энергопотребление, уменьшить затраты на техническое обслуживание и реализовать переход к обслуживанию оборудования по его фактическому состоянию.

Особую актуальность вопросы модернизации КСО ВПП приобретают для аэродромов Республики Казахстан. Значительная часть аэродромной инфраструктуры введена в эксплуатацию несколько десятилетий назад и требует последовательного технического обновления. Дополнительные требования обусловлены резко континентальными климатическими условиями страны, характеризующимися значительными сезонными колебаниями температуры воздуха (от минус 40...45 °С в северных регионах зимой до температуры покрытия ВПП свыше плюс 60 °С в южных регионах летом), высокой повторяемостью неблагоприятных метеорологических явлений, а также повышенными ветровыми и пылевыми нагрузками [6–8]. Указанные факторы существенно влияют на надёжность функционирования светотехнического оборудования и требуют применения современных технических решений, обеспечивающих устойчивую работу систем управления в широком диапазоне эксплуатационных условий.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показывает, что большинство опубликованных работ посвящено совершенствованию конструкций светосигнальных огней, повышению энергетической эффективности аэродромных систем освещения, разработке методов диагностики технического состояния оборудования и внедрению светодиодных технологий [5, 9–16]. Вместе с тем значительно меньше внимания уделено комплексному анализу архитектуры современных систем управления КСО ВПП, оценке ограничений существующих технических решений и определению направлений их модернизации применительно к условиям эксплуатации аэродромов Республики Казахстан. Это определяет актуальность настоящего исследования.

Объектом исследования являются автоматизированные системы управления комплексами светотехнического оборудования взлётно-посадочных полос аэродромов гражданской авиации.

Предмет исследования составляют принципы построения, функционирования, диагностики и перспективные направления модернизации систем управления КСО ВПП с учётом современных требований к обеспечению безопасности полётов и особенностей эксплуатации аэродромов Республики Казахстан.

Цель исследования заключается в комплексном анализе современных комплексов светотехнического оборудования взлётно-посадочных полос как объектов автоматизированного управления, выявлении ограничений существующих систем управления и разработке научно обоснованных рекомендаций по совершенствованию их архитектуры и перспективных направлений развития с учётом современных требований к обеспечению безопасности полётов и особенностей эксплуатации аэродромов Республики Казахстан.

Научная новизна исследования состоит в комплексном анализе современных архитектур систем управления КСО ВПП с позиций автоматизации технологических процессов, выявлении основных ограничений существующих решений и обосновании направлений их модернизации применительно к условиям эксплуатации аэродромов Республики Казахстан. В отличие от существующих обзорных работ особое внимание уделено вопросам интеграции распределённых средств мониторинга технического состояния оборудования, использованию беспроводных технологий передачи данных в не критичных контурах диагностики и мониторинга, а также оценке перспектив развития КСО ВПП в рамках концепции цифрового аэродрома.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов при модернизации автоматизированных систем управления светотехническим оборудованием аэродромов гражданской авиации и разработке рекомендаций по развитию цифровой аэродромной инфраструктуры Республики Казахстан.

Авторский вклад авторов заключается в систематизации современных подходов к построению автоматизированных систем управления комплексами светотехнического оборудования взлётно-посадочных полос, комплексном анализе ограничений существующих архитектур управления, а также в разработке научно обоснованных рекомендаций по

модернизации КСО ВПП с учётом современных требований к обеспечению безопасности полётов и особенностей эксплуатации аэродромов Республики Казахстан.

Комплексы светотехнического оборудования как средство обеспечения безопасности полётов

Комплексы светотехнического оборудования взлётно-посадочных полос (КСО ВПП) относятся к числу критически важных элементов аэродромной инфраструктуры, обеспечивающих безопасное выполнение взлётно-посадочных операций в условиях ограниченной видимости и в тёмное время суток. Их основное назначение заключается в формировании непрерывной визуальной информационной среды, позволяющей экипажу воздушного судна своевременно оценивать пространственное положение относительно оси взлётно-посадочной полосы, порога полосы, зоны приземления и расчётной траектории снижения [1–3].

Эффективность функционирования КСО ВПП непосредственно влияет на уровень безопасности полётов. При выполнении захода на посадку в сложных метеорологических условиях светосигнальное оборудование становится основным источником визуальной информации для экипажа после выхода воздушного судна из облачности. Поэтому к составу, фотометрическим характеристикам, надёжности и отказоустойчивости светосигнальных систем предъявляются повышенные требования, регламентируемые Приложением 14 к Конвенции о международной гражданской авиации (Annex 14 ICAO), Руководством по проектированию аэродромов ICAO Doc 9157 и национальными авиационными правилами государств – участников ИКАО [1, 2, 6].

В зависимости от категории точного захода на посадку (CAT I, CAT II и CAT III) изменяются состав комплекса светотехнического оборудования, требования к резервированию его элементов и допустимый уровень отказов. С повышением категории возрастает роль автоматизированных средств управления, поскольку даже кратковременный отказ отдельных подсистем может привести к ограничению эксплуатации аэродрома либо временному прекращению выполнения полётов. По этой причине при проектировании современных КСО ВПП особое внимание уделяется вопросам отказоустойчивости, резервирования оборудования и непрерывного контроля его технического состояния [1].

Структура комплекса включает несколько функционально взаимосвязанных подсистем, каждая из которых обеспечивает решение определённой навигационной задачи. Система огней подхода (Approach Lighting System, ALS) формирует визуальный ориентир для обнаружения оси посадки после выхода воздушного судна из облачности. Огни порога (Threshold Lights, THL) обозначают начало взлётно-посадочной полосы, огни края полосы (Runway Edge Lights, REL) обеспечивают визуальное восприятие её границ, а огни осевой линии (Runway Centre Line Lights, RCLL) позволяют пилоту сохранять требуемое направление движения при выполнении посадки и пробега. Огни зоны приземления (Touchdown Zone Lights, TDZL) используются для точного определения участка касания, а системы визуальной индикации глиссады PAPI и VASIS обеспечивают контроль положения воздушного судна относительно расчётной траектории снижения [2, 3].

Следует отметить, что перечисленные подсистемы функционируют не изолированно, а как единый технологический комплекс, эффективность которого определяется согласованной работой всех элементов. Отказ отдельных светосигнальных устройств способен привести к ухудшению условий визуального пилотирования, снижению пропускной способности аэродрома и увеличению эксплуатационных ограничений. Именно поэтому современные комплексы рассматриваются не только как совокупность светотехнических устройств, но и как объект автоматизированного управления, требующий постоянного контроля технического состояния, оперативного обнаружения неисправностей и своевременного формирования управляющих воздействий.

Состав комплексов светотехнического оборудования для различных категорий точного захода на посадку приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Состав КСО ВПП в зависимости от категории точного захода на посадку.

Подсистема	CAT I	CAT II	CAT III
Система огней подхода ALS	420–900 м	900 м	900 м + SF
Огни порога THL	+	+	+
Огни края ВПП REL	+	+	+
Огни осевой линии RCLL	–	+	+
Огни зоны приземления TDZL	–	+	+
РАРІ/VASIS	+	+	+
Последовательно мигающие огни	–	±	+

Анализ данных таблицы 1 показывает, что повышение категории точного захода на посадку сопровождается не только увеличением количества применяемых светосигнальных подсистем, но и существенным ростом требований к надёжности их функционирования, скорости обнаружения отказов и эффективности автоматизированного управления. Для аэродромов категории CAT III допустимый уровень отказов отдельных элементов минимален, поскольку нарушение работоспособности даже одной из критически важных подсистем способно привести к временному ограничению эксплуатации аэродрома. В этих условиях дальнейшее развитие КСО ВПП связано не столько с совершенствованием отдельных светотехнических устройств, сколько с повышением интеллектуальности систем управления, расширением возможностей автоматизированной диагностики и внедрением средств непрерывного мониторинга технического состояния оборудования.

Современные принципы построения систем управления КСО ВПП

Современные системы управления комплексами светотехнического оборудования взлётно-посадочных полос представляют собой специализированные автоматизированные системы управления технологическими процессами, обеспечивающие централизованное управление режимами работы светосигнального оборудования, непрерывный контроль технического состояния элементов комплекса, регистрацию эксплуатационных событий и информационную поддержку диспетчерского персонала [4, 5, 10].

Развитие средств автоматизации аэродромов привело к переходу от локальных схем управления отдельными группами светосигнальных огней к распределённым многоуровневым системам, объединяющим функции управления, диагностики, мониторинга и архивирования эксплуатационной информации. Такая архитектура обеспечивает повышение отказоустойчивости комплекса, сокращение времени обнаружения неисправностей и возможность интеграции КСО ВПП в единую цифровую инфраструктуру аэродрома.

Наиболее распространённой является трёхуровневая архитектура системы управления, включающая верхний, средний и нижний уровни (рисунок 1).

Верхний уровень представлен автоматизированным рабочим местом диспетчера командно-диспетчерского пункта, функционирующим на базе SCADA/HMI-систем. На данном уровне осуществляется выбор режима работы светосигнального оборудования, управление интенсивностью свечения отдельных подсистем, отображение информации о техническом состоянии комплекса, регистрация действий оператора и архивирование эксплуатационных данных. Дополнительно обеспечивается визуализация аварийных сообщений, формирование журналов событий и информационная поддержка принятия решений диспетчером [10, 13].

Средний уровень включает программируемые логические контроллеры (PLC), реализующие алгоритмы автоматизированного управления и координирующие взаимодействие между верхним уровнем и исполнительным оборудованием. Контроллеры принимают команды оператора, контролируют их корректность, формируют управляющие воздействия на исполнительные устройства, обрабатывают диагностическую информацию и обеспечивают обмен данными по промышленным протоколам связи. Для аэродромов категорий CAT II и CAT III предусматривается резервирование контроллеров и применение

схем горячего резерва, позволяющих сохранить работоспособность системы при отказе отдельных аппаратных компонентов [1].

Нижний уровень образуют регуляторы постоянного тока (CCR), изоляционные трансформаторы, коммутационные устройства и светосигнальные огни. Основной задачей данного уровня является непосредственное выполнение управляющих воздействий, поступающих от программируемых контроллеров, поддержание заданного значения тока в последовательных цепях питания, контроль электрических параметров и передача диагностической информации в систему управления [11].

Функционирование системы управления основано на непрерывном обмене информацией между её уровнями. Управляющие команды передаются от автоматизированного рабочего места диспетчера к программируемым контроллерам, далее — к регуляторам постоянного тока и исполнительным устройствам. В обратном направлении передаются сведения о режимах работы оборудования, значениях электрических параметров, состоянии отдельных подсистем, возникновении неисправностей и результатах выполнения управляющих команд. Такая организация информационного обмена обеспечивает оперативное выявление отклонений и своевременное принятие решений по восстановлению работоспособности комплекса.

В соответствии с требованиями ИКАО регулирование яркости светосигнальных огней осуществляется дискретно. В большинстве современных систем реализуется пятиступенчатое управление интенсивностью свечения, позволяющее адаптировать работу светосигнального оборудования к дневным, ночным и неблагоприятным метеорологическим условиям. Изменение уровня яркости производится централизованно с учётом категории аэродрома, текущих условий видимости и требований службы управления воздушным движением [1, 2].

Одним из ключевых направлений совершенствования современных систем управления является развитие средств технической диагностики. В традиционных системах контроль технического состояния основан преимущественно на измерении электрических параметров последовательных цепей питания, что позволяет обнаружить наличие неисправности, однако не обеспечивает её точную локализацию [14]. Применение распределённых диагностических модулей и интеллектуальных датчиков позволяет контролировать параметры работы отдельных светосигнальных устройств, включая величину тока, напряжение питания, температуру, состояние источников света и параметры окружающей среды. Это создаёт предпосылки для перехода от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию оборудования по его фактическому техническому состоянию. Типовая структура системы управления КСО ВПП представлена на рисунке 1.

Для организации обмена информацией между компонентами комплекса в настоящее время преимущественно используются проводные промышленные сети на базе протоколов Modbus RTU, PROFIBUS DP и PROFINET, обеспечивающих высокую скорость передачи данных, устойчивость к электромагнитным помехам и требуемую надёжность функционирования систем управления [13].

Одновременно развивается применение беспроводных технологий передачи данных, прежде всего для организации распределённых систем мониторинга технического состояния оборудования. Среди таких решений значительный интерес представляет технология LoRa (Long Range), использующая метод модуляции Chirp Spread Spectrum и обеспечивающая энергоэффективную передачу диагностической информации на значительные расстояния [11, 12]. Вместе с тем анализ её технических характеристик показывает, что ограничения по скорости передачи данных и задержкам обмена не позволяют рассматривать LoRa как замену проводным промышленным сетям в контурах критически важного управления светосигнальным оборудованием. Наиболее рациональной областью её применения являются задачи удалённого мониторинга, сбора диагностической информации и контроля состояния распределённых объектов аэродромной инфраструктуры.

Проведённый анализ показывает, что дальнейшее развитие систем управления КСО ВПП связано с интеграцией интеллектуальных алгоритмов поддержки принятия решений, развитием распределённых средств диагностики, использованием технологий предиктивного обслуживания оборудования и созданием единого цифрового информационного пространства аэродрома.

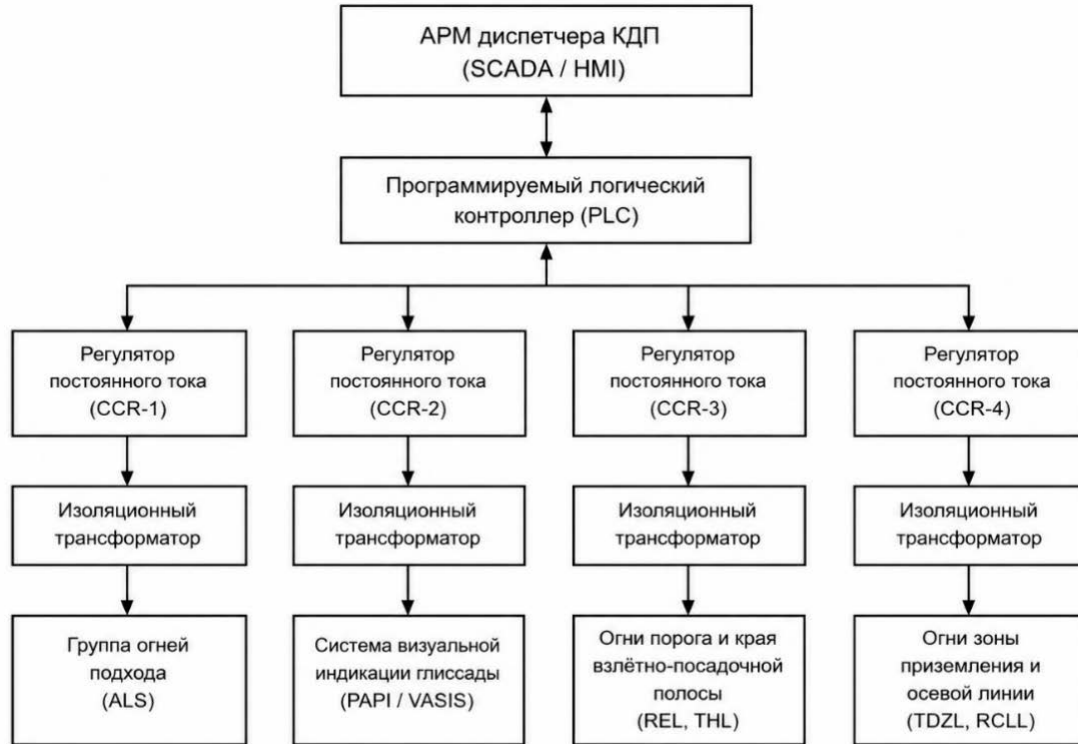


Рисунок 1 – Иерархическая структура системы управления комплексом светотехнического оборудования взлётно-посадочной полосы.

Особенности эксплуатации комплексов светотехнического оборудования в условиях Республики Казахстан

Эксплуатация комплексов светотехнического оборудования взлётно-посадочных полос на территории Республики Казахстан осуществляется в условиях значительной климатической неоднородности, что оказывает непосредственное влияние на надёжность функционирования оборудования, периодичность технического обслуживания и требования к системам автоматизированного управления. В отличие от регионов с умеренным климатом, аэродромная инфраструктура Казахстана эксплуатируется в широком диапазоне температур, при интенсивных ветровых нагрузках, высокой запылённости отдельных территорий и выраженной сезонной изменчивости погодных условий [6–8].

Наиболее сложные условия эксплуатации характерны для северных и центральных регионов страны, где температура окружающего воздуха в зимний период может снижаться до минус 40–45 °С, тогда как летом температура покрытия взлётно-посадочной полосы в южных областях достигает 60–70 °С. Подобные температурные перепады вызывают дополнительные механические и термические нагрузки на кабельные линии, изоляционные трансформаторы, светосигнальные огни и электронные компоненты систем управления, что увеличивает вероятность возникновения отказов и сокращает срок службы оборудования [6].

Существенное влияние на эксплуатационную надёжность оказывают также ветровые нагрузки, пылевые загрязнения и атмосферные осадки. Попадание влаги, пыли и загрязнений в светосигнальные устройства приводит к снижению светового потока, ухудшению

фотометрических характеристик и ускоренному износу отдельных элементов оборудования. В этих условиях возрастает значение автоматизированных средств контроля технического состояния, позволяющих своевременно выявлять отклонения эксплуатационных параметров и планировать проведение профилактических работ.

Особое место занимает аэропорт Алматы, расположенный в предгорной зоне Заилийского Алатау. Особенности рельефа местности обуславливают повышенную повторяемость туманов, низкой облачности и сложных метеорологических условий, особенно в осенне-зимний период [8]. В результате значительно возрастает интенсивность использования режимов точного захода на посадку, что предъявляет повышенные требования к надёжности функционирования комплексов светотехнического оборудования и эффективности их автоматизированного управления.

Следует учитывать, что значительная часть аэродромной инфраструктуры Республики Казахстан была введена в эксплуатацию в 1970–1990-х годах. Несмотря на проводимую модернизацию отдельных аэропортов, на ряде объектов продолжают использоваться системы, ресурс которых в значительной степени исчерпан. В первую очередь это относится к кабельным сетям, регуляторам постоянного тока и отдельным элементам светосигнального оборудования, что усложняет внедрение современных цифровых технологий без проведения комплексной реконструкции аэродромной инфраструктуры.

Одним из наиболее эффективных направлений модернизации является переход на светодиодные светосигнальные системы. По сравнению с традиционными галогенными источниками света светодиодные устройства обладают более высокой энергетической эффективностью, увеличенным сроком службы, меньшими эксплуатационными затратами и повышенной устойчивостью к механическим воздействиям [6]. Дополнительным преимуществом является возможность интеграции встроенных средств диагностики, дистанционного мониторинга и интеллектуального управления режимами работы оборудования.

Анализ условий эксплуатации показывает, что для аэродромов Республики Казахстан наибольший эффект может быть достигнут при комплексной модернизации КСО ВПП, предусматривающей одновременное обновление светосигнального оборудования, внедрение современных автоматизированных систем управления, распределённых средств диагностики и цифровых технологий мониторинга технического состояния оборудования. Такой подход позволит повысить эксплуатационную надёжность комплексов, сократить затраты на техническое обслуживание и обеспечить соответствие аэродромной инфраструктуры современным международным требованиям по безопасности полётов.

Анализ ограничений существующих систем управления КСО ВПП

Несмотря на высокий уровень развития современных комплексов светотехнического оборудования, существующие системы управления КСО ВПП сохраняют ряд технических и организационных ограничений, снижающих эффективность эксплуатации аэродромной инфраструктуры и усложняющих её дальнейшую модернизацию. Проведённый анализ отечественных и зарубежных решений показывает, что большинство применяемых систем разрабатывались с ориентацией на обеспечение требуемого уровня надёжности функционирования светосигнального оборудования, однако их архитектура в меньшей степени учитывает современные требования к цифровизации процессов управления, непрерывному мониторингу технического состояния оборудования и интеллектуальной поддержке принятия решений [9, 10, 15].

Одним из основных ограничений является высокая зависимость процесса управления светосигнальным оборудованием от действий диспетчерского персонала. В большинстве эксплуатируемых систем изменение режимов работы комплекса выполняется оператором после получения информации от службы управления воздушным движением. Несмотря на высокую надёжность подобной схемы, наличие человека в контуре управления увеличивает время реакции системы и повышает вероятность возникновения ошибок при интенсивном

воздушном движении либо в условиях повышенной психофизиологической нагрузки на диспетчера [9].

Другим существенным ограничением является недостаточная автоматизация процессов контроля технического состояния оборудования. В большинстве действующих комплексов диагностика осуществляется на основании контроля электрических параметров последовательных цепей питания, прежде всего силы тока и напряжения. Такой подход позволяет своевременно определить факт возникновения неисправности, однако не обеспечивает идентификацию конкретного отказавшего элемента без проведения дополнительных проверок непосредственно на аэродроме. В результате увеличиваются продолжительность поиска неисправностей, время восстановления работоспособности оборудования и эксплуатационные затраты [14, 15].

Анализ существующих систем показывает также ограниченные возможности прогнозирования отказов оборудования. Применяемые алгоритмы диагностики ориентированы преимущественно на регистрацию уже возникших неисправностей и практически не используют методы оценки остаточного ресурса элементов комплекса. Отсутствие средств предиктивной диагностики затрудняет переход к обслуживанию оборудования по его фактическому техническому состоянию и приводит к сохранению планово-предупредительной стратегии технического обслуживания.

Отдельной проблемой остаётся модернизация действующих аэродромных комплексов. Значительная часть эксплуатируемых систем создавалась с использованием централизованной кабельной инфраструктуры, реконструкция которой сопровождается существенными финансовыми затратами и необходимостью временного ограничения эксплуатации отдельных объектов аэродромной инфраструктуры. По этой причине внедрение новых средств диагностики и мониторинга требует поиска технических решений, позволяющих расширять функциональные возможности существующих комплексов без масштабной реконструкции кабельных сетей.

Следует отметить, что применение беспроводных технологий передачи данных также имеет определённые ограничения. Несмотря на перспективность использования LoRa и аналогичных решений для организации распределённого мониторинга, их технические характеристики не обеспечивают выполнение требований, предъявляемых к контурам управления критически важным светосигнальным оборудованием. Ограниченная скорость передачи данных, наличие задержек обмена информацией и зависимость качества радиосвязи от условий распространения сигнала не позволяют рассматривать беспроводные сети как замену проводным промышленным интерфейсам управления. В связи с этим использование подобных технологий является целесообразным преимущественно для передачи диагностической информации, контроля технического состояния оборудования и организации удалённого мониторинга распределённых объектов аэродромной инфраструктуры [11, 12].

Выполненный анализ показывает, что дальнейшее совершенствование систем управления КСО ВПП должно быть направлено на комплексное решение нескольких взаимосвязанных задач: снижение влияния человеческого фактора на процессы управления, развитие интеллектуальных средств диагностики, внедрение методов прогнозирования технического состояния оборудования, расширение возможностей автоматизированного мониторинга и обеспечение совместной работы проводных систем управления с беспроводными средствами передачи диагностической информации. Реализация указанных направлений позволит повысить эксплуатационную надёжность комплексов светотехнического оборудования, сократить время восстановления работоспособности после возникновения отказов и обеспечить дальнейшее развитие аэродромной инфраструктуры в соответствии с концепцией цифрового аэродрома.

Для систематизации результатов проведённого анализа основные ограничения существующих систем управления КСО ВПП, их эксплуатационные последствия и перспективные направления совершенствования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные ограничения существующих систем управления КСО ВПП и направления их совершенствования

Ограничение	Эксплуатационные последствия	Перспективное направление совершенствования
Высокая зависимость процессов управления от действий диспетчера	Увеличение времени реакции системы, вероятность ошибок при высокой интенсивности воздушного движения	Развитие алгоритмов автоматизированной поддержки принятия решений и интеллектуальных средств управления
Ограниченные возможности диагностики	Увеличение времени поиска неисправностей и восстановления работоспособности оборудования	Внедрение распределённых диагностических модулей и интеллектуальных датчиков
Отсутствие прогнозирования технического состояния оборудования	Применение планово-предупредительного обслуживания и увеличение эксплуатационных затрат	Использование методов предиктивной диагностики и оценки остаточного ресурса
Централизованная кабельная инфраструктура	Высокая стоимость модернизации существующих комплексов	Использование гибридной архитектуры с проводными системами управления и беспроводными средствами мониторинга
Недостаточная интеграция эксплуатационных данных	Ограниченные возможности анализа технического состояния оборудования	Формирование единого цифрового информационного пространства аэродрома

Представленные результаты свидетельствуют о том, что дальнейшее совершенствование систем управления КСО ВПП должно осуществляться не путем замены существующей архитектуры, а посредством ее поэтапной модернизации за счет интеграции интеллектуальных средств диагностики и цифровых технологий мониторинга. Такой подход обеспечивает возможность модернизации действующих аэродромов без существенного изменения существующей кабельной инфраструктуры.

Перспективы развития систем управления КСО ВПП

Современные тенденции развития аэродромной инфраструктуры свидетельствуют о постепенном переходе от традиционных систем управления светотехническим оборудованием к интеллектуальным автоматизированным комплексам, обеспечивающим интеграцию функций управления, мониторинга, диагностики и информационной поддержки эксплуатационного персонала. Дальнейшее совершенствование КСО ВПП должно быть ориентировано не только на повышение надежности отдельных технических средств, но и на создание единой цифровой среды управления аэродромной инфраструктурой.

Одним из наиболее перспективных направлений является развитие интеллектуальных систем технической диагностики, обеспечивающих непрерывный контроль эксплуатационного состояния оборудования. В отличие от традиционных методов контроля, фиксирующих факт возникновения неисправности, современные диагностические системы позволяют осуществлять непрерывный анализ параметров функционирования оборудования, выявлять признаки его деградации и прогнозировать вероятность возникновения отказов. Использование подобных решений создает предпосылки для перехода от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому техническому состоянию оборудования [14, 15].

Важным направлением модернизации является дальнейшее внедрение светодиодных технологий. Применение светодиодных источников света позволяет повысить энергетическую эффективность комплексов светотехнического оборудования, увеличить ресурс эксплуатации светосигнальных устройств, снизить эксплуатационные расходы и обеспечить возможность интеграции встроенных средств диагностики и дистанционного контроля технического состояния оборудования [6].

Существенные возможности открывает развитие распределённых систем мониторинга, предназначенных для оперативного сбора диагностической информации с территориально распределённых объектов аэродромной инфраструктуры. В этой связи особый интерес представляет применение беспроводных технологий передачи данных, позволяющих организовать обмен диагностической информацией без создания дополнительной кабельной инфраструктуры. Однако результаты проведённого анализа показывают, что использование технологии LoRa является целесообразным преимущественно при решении задач мониторинга и диагностики оборудования, тогда как функции управления светосигнальными системами должны реализовываться посредством проводных промышленных интерфейсов, удовлетворяющих требованиям по надёжности, быстродействию и отказоустойчивости.

Сравнительная характеристика наиболее распространённых технологий передачи данных, применяемых в системах управления и мониторинга КСО ВПП, представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика технологий передачи данных, применяемых в системах управления и мониторинга КСО ВПП

Параметр	Modbus RTU	PROFIBUS DP	PROFINET	LoRa
Среда передачи	RS-485	RS-485	Industrial Ethernet	Радиоканал
Скорость передачи данных	до 115 кбит/с	до 12 Мбит/с	до 100 Мбит/с	0,3–50 кбит/с
Типичная дальность связи	до 1,2 км	до 1,2 км	до 100 м (по медному кабелю)	до 15–20 км
Необходимость кабельной инфраструктуры	Да	Да	Да	Нет
Устойчивость к электромагнитным помехам	Высокая	Высокая	Высокая	Зависит от условий распространения сигнала
Применение в контурах управления	Да	Да	Да	Не рекомендуется
Применение для мониторинга и диагностики	Да	Да	Да	Наиболее эффективно
Основное преимущество	Простота реализации	Высокая надёжность	Высокая скорость обмена	Большая дальность связи и отсутствие кабельной инфраструктуры
Основное ограничение	Ограниченная скорость	Стоимость оборудования	Требования к сетевой инфраструктуре	Ограниченная скорость передачи данных и невозможность использования в контурах критически важного управления

Примечание – Указанные значения дальности передачи данных для проводных технологий приведены для стандартных линий связи. При использовании оптоволоконных линий связи и соответствующего сетевого оборудования дальность передачи может быть существенно увеличена без снижения надёжности и скорости обмена данными.

Как следует из данных таблицы 3, проводные промышленные сети сохраняют преимущества при реализации контуров управления светосигнальным оборудованием благодаря высокой скорости обмена данными, минимальным задержкам передачи информации и высокой эксплуатационной надёжности. В то же время технология LoRa обладает значительным потенциалом при организации распределённых систем мониторинга

и диагностики, обеспечивая снижение затрат на модернизацию существующей инфраструктуры без нарушения требований к безопасности функционирования систем управления.

Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция систем управления КСО ВПП с другими информационными подсистемами аэродрома, включая системы электроснабжения, метеорологического обеспечения, технической эксплуатации и управления воздушным движением. Формирование единого информационного пространства позволит повысить эффективность эксплуатации аэродромной инфраструктуры, обеспечить централизованный анализ эксплуатационных данных и создать основу для внедрения технологий цифрового аэродрома.

Заключение

В результате проведённого исследования выполнен комплексный анализ современных комплексов светотехнического оборудования взлётно-посадочных полос как объектов автоматизированного управления и определены основные направления их дальнейшего развития. Установлено, что повышение требований к безопасности полётов, расширение применения светодиодных технологий и цифровизация аэродромной инфраструктуры обуславливают необходимость совершенствования существующих систем управления КСО ВПП.

Показано, что современные системы управления обладают высокой эксплуатационной надёжностью и соответствуют требованиям международных нормативных документов, однако сохраняют ряд ограничений, связанных с недостаточной автоматизацией процессов диагностики, ограниченными возможностями прогнозирования технического состояния оборудования, высокой стоимостью модернизации кабельной инфраструктуры и существенной зависимостью отдельных процессов управления от действий эксплуатационного персонала.

На основании проведённого анализа обосновано, что наиболее перспективными направлениями совершенствования систем управления КСО ВПП являются внедрение интеллектуальных средств диагностики, переход к обслуживанию оборудования по его фактическому техническому состоянию, развитие распределённых систем мониторинга и интеграция автоматизированных комплексов управления в единое цифровое информационное пространство аэродрома. При этом установлено, что применение беспроводных технологий передачи данных, включая LoRa, является целесообразным преимущественно для организации мониторинга и диагностики технического состояния оборудования, тогда как функции управления критически важными объектами должны реализовываться посредством проводных промышленных интерфейсов связи.

Практическая значимость выполненного исследования заключается в возможности использования полученных результатов при модернизации существующих комплексов светотехнического оборудования аэродромов гражданской авиации, разработке перспективных автоматизированных систем управления и выборе технических решений для повышения эксплуатационной надёжности аэродромной инфраструктуры, в том числе с учётом особенностей эксплуатации аэродромов Республики Казахстан.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на разработку интеллектуальных алгоритмов управления, методов предиктивной диагностики и цифровых технологий мониторинга, обеспечивающих повышение безопасности и эффективности выполнения взлётно-посадочных операций.

Литература

1. Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation. Volume I. Aerodrome Design and Operations. – 9th ed. – Montreal: ICAO, 2022. – 820 p.
2. ICAO Doc 9157. Aerodrome Design Manual. Part 4. Visual Aids. – 5th ed. – Montreal: ICAO, 2021. – 174 p.

3. ICAO Doc 8168. Procedures for Air Navigation Services. Aircraft Operations. Volume I. Flight Procedures. – Montreal: ICAO, 2021. – 690 p.
4. ГОСТ 33385–2015. Аэродромы. Светосигнальное оборудование. Общие технические требования. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 42 с.
5. ГОСТ ИЕС 61822–2012. Электроустановки аэродромов. Системы аэродромного освещения постоянным током. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 56 с.
6. Авиационные правила Республики Казахстан. Книга 14. Аэродромы. – Астана: КГА МТ РК, 2023. – 418 с.
7. Скрипниченко С.Ю. Светосигнальное оборудование аэродромов гражданской авиации. – Санкт-Петербург: Политехника, 2012. – 286 с.
8. Белгородский С.Л. Светосигнальное оборудование аэродромов. – Москва: Транспорт, 1988. – 272 с.
9. Крыжановский Г.А. Аэродромные светотехнические системы. – Москва: Машиностроение, 1990. – 304 с.
10. Унгуриян С.Г. Автоматизированные системы управления аэродромным оборудованием. – Киев: НАУ, 2015. – 318 с.
11. Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W. A Study of LoRa: Long Range and Low Power Networks for the Internet of Things // Sensors. – 2016. – Vol.16. – №9. – P.1466.
12. Bor M., Vidler J., Roedig U. LoRa for the Internet of Things // Proceedings of the International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks. – Graz, Austria, 2016. – P.361–366.
13. Mayer J., Vollrath M. Modern Airfield Lighting Control Systems: Architecture and Operational Experience // Aerospace. 2021. Vol. 8. № 11. P. 321.
14. Chen J., Wang X., Li Y. Intelligent Airport Lighting Monitoring System Based on Wireless Sensor Networks // IEEE Access. – 2020. – Vol.8. – P.115624–115633.
15. Li M., Zhao H., Sun J. Condition Monitoring Method for Airfield Ground Lighting Systems Using Distributed Sensors // Sensors. – 2021. – Vol.21. – No.18. – P.6174.
16. Zuo Y., Wang P., Chen X. Research on Smart Airport Lighting System Architecture // Journal of Air Transport Management. – 2022. – Vol.102. – Article 102230.
17. ГОСТ ИЕС 61140–2012. Защита от поражения электрическим током. Общие положения безопасности. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 34 с.
18. ГОСТ Р 59751–2021. Аэродромы. Электроснабжение и светосигнальное оборудование. Общие требования.