

УДК 656.2:004.415.2

О. Исмаилов, ismayilov8958@gmail.com

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ SCADA-ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Безопасность железнодорожного транспорта во многом определяется тем, насколько эффективно система диспетчерского управления справляется с потоком данных в реальном времени. В данной статье рассматриваются функциональная оптимизация и архитектурное проектирование объектно-ориентированной SCADA-платформы для систем железнодорожной сигнализации. Исследование базируется на практическом применении программной платформы zenon и направлено на устранение характерных недостатков традиционных SCADA-систем: перегрузки оператора, задержек обновления состояний, отсутствия приоритетности тревог и невозможности обновления системы без остановки. Предлагаемая архитектура обеспечивает мониторинг рельсовых цепей, светофоров, стрелочных переводов и поездов с точностью до миллисекунды. Встроенный модуль автоматического задания маршрутов (ARS) берёт на себя выполнение многошаговой последовательности активации маршрута без участия оператора. Трёхуровневая иерархия тревог снижает операторскую нагрузку и концентрирует внимание на действительно критических событиях. Использование шаблонов smart-объектов сокращает время проектирования примерно на 60% и исключает необходимость изменений на уровне программного кода при расширении топологии. Данные, накапливаемые в модуле zenon Historian, создают основу для предиктивного технического обслуживания путевого оборудования. Полученные результаты свидетельствуют о том, что гибкая объектно-ориентированная SCADA-архитектура является не перспективным направлением, а практической необходимостью для современных железнодорожных систем.

Ключевые слова: SCADA; железнодорожная сигнализация; программная платформа zenon; объектно-ориентированная архитектура; автоматическое задание маршрутов; управление тревогами; предиктивное техническое обслуживание

Введение

Безопасная и бесперебойная работа железнодорожного транспорта неотделима от качества функционирования систем сигнализации. Именно эти системы решают задачи маршрутизации поездов, контроля занятости блок-участков и выдачи разрешений на движение — то есть обеспечивают безопасные интервалы между поездами и исключают столкновения. На высокоскоростных линиях, в системах маглев и городских транзитных сетях с плотным графиком цена ошибки практически равна нулю: любая задержка или неопределённость в системе управления немедленно сказывается на безопасности.

Системы SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) стали стандартным инструментом централизованного управления железнодорожной сигнализацией. Они собирают информацию о текущем состоянии путевого оборудования — рельсовых цепей, светофоров, стрелочных переводов, поездов — и отображают её диспетчеру, одновременно обеспечивая надёжную передачу управляющих команд с центрального поста на поле. Такой двусторонний информационный обмен повышает общий уровень безопасности и ускоряет принятие оперативных решений [7].

Традиционные SCADA-системы, однако, несут в себе ряд хорошо известных функциональных ограничений. Пользовательские интерфейсы нередко перегружены и визуально несогласованны, что создаёт когнитивную нагрузку и замедляет оценку обстановки [4]. Обновление состояний может запаздывать из-за архитектур на основе циклического опроса и задержек отклика ПЛК. Системы тревог представляют все события на одном уровне приоритетности, порождая так называемую «усталость от тревог» [8]. Задание маршрута выполняется вручную в несколько последовательных шагов — серьёзный источник ошибок на занятых станциях [3]. Наконец, добавление нового путевого

оборудования, как правило, требует изменений в программном коде и полной остановки системы — что неприемлемо в условиях круглосуточной эксплуатации [5].

Настоящая статья посвящена проектированию и реализации функционально оптимизированной SCADA-платформы на основе программного обеспечения zenon [1]. Анализируется каждая ключевая функциональная область: мониторинг рельсовых цепей, управление светофорами, контроль стрелочных переводов, интеграция переездов, автоматическое задание маршрутов и управление тревогами. Статья структурирована следующим образом: раздел 2 — обзор состояния области; раздел 3 — анализ функций путевых объектов; раздел 4 — проблемы традиционных систем; раздел 5 — решения на платформе zenon; разделы 6 и 7 — предиктивное обслуживание и сравнительный анализ; раздел 8 — заключение.

Современное состояние и область исследования

Железнодорожный транспорт переживает масштабную цифровую трансформацию. Электромеханические реле и изолированные контурные схемы постепенно уступают место интегрированным киберфизическим системам, использующим беспроводную связь, облачные интерфейсы и программно-определяемую логику. SCADA-платформы занимают центральное место в этом переходе: из инструментов пассивного сбора данных они превращаются в системы поддержки принятия решений в реальном времени, дополненные технологиями искусственного интеллекта, Интернета вещей и аналитики больших данных [9].

Масштаб инвестиций в эту трансформацию отражает динамика мирового рынка. По независимым оценкам, объём рынка систем железнодорожной сигнализации составит около 17,1 млрд долл. США в 2024 году и вырастет до 43,2 млрд долл. к 2035 году [5]. Среди ключевых направлений исследований — переход на стандарт FRMCS (Future Railway Mobile Communication System) на базе 5G, предлагающий более высокую пропускную способность и меньшие задержки по сравнению с GSM-R. Активно развивается технология цифровых двойников: виртуальные копии инфраструктуры позволяют тестировать стратегии обслуживания и прогнозировать отказы до их возникновения [2]. Конвергенция IT и OT-сетей открывает новые уязвимости в системах сигнализации, что делает кибербезопасность самостоятельным и приоритетным направлением исследований.

Настоящее исследование сосредоточено на уровне самой SCADA-платформы — на том, как объектно-ориентированная архитектура и современный программный инструментарий способны устранить функциональные проблемы, с которыми оперативный персонал сталкивается ежедневно. Охватываемые области: мониторинг путевого сигнального оборудования в реальном времени; применение объектно-ориентированных и модульных возможностей zenon для сокращения времени проектирования и поддержки непрерывного развёртывания; реализация логики автоматического задания маршрутов; структурированное управление тревогами [1].

Функциональный анализ путевых объектов сигнализации

SCADA-платформа для железнодорожной сигнализации строится вокруг набора функциональных модулей, каждый из которых соответствует определённой категории путевого оборудования. Вместе они формируют целостную оперативную картину, которую диспетчер использует для наблюдения и управления движением поездов.

Рельсовые цепи делят железнодорожную линию на блок-участки и определяют, занят ли каждый из них поездом [3]. Система SCADA непрерывно опрашивает эти цепи и отображает их состояние на экране диспетчера с использованием единой цветовой схемы: белый — свободный участок, красный — занятый. Такая наглядная индикация позволяет диспетчеру моментально оценить расположение поездов на сети и проверить безопасность любого предполагаемого маршрута до его открытия.

Светофоры сообщают машинистам о разрешении или запрете движения. Помимо отображения текущего показания каждого светофора, SCADA-платформа контролирует

исправность самого оборудования. Перегорание лампы или любая техническая неисправность фиксируются немедленно и регистрируются как тревога. Операторы могут также централизованно управлять светофорами в рамках условий безопасности, определённых логикой станционной централизации [3].

Стрелочные приводы — электромеханические устройства, физически переводящие рельсы для изменения направления движения поезда [3]. Система отслеживает три параметра каждого привода: текущее положение (плюсовое или минусовое), состояние замыкания (надёжно ли зафиксирован механизм) и сигнал контроля (соответствует ли отчёт с поля поданной команде). Любое расхождение между командой и контролем, а также задержка перевода автоматически генерируют предупреждение.

Переезды — места пересечения железной дороги с автомобильными дорогами — вводят прямое взаимодействие железнодорожного и автомобильного движения в систему управления. SCADA в реальном времени контролирует открытое и закрытое состояние каждого шлагбаума. Если шлагбаум не закрывается при приближении поезда или в механизме обнаруживается неисправность, событие классифицируется как высокоприоритетное и немедленно сигнализируется диспетчеру [3].

АЗМ — логический уровень, превращающий многошаговую ручную процедуру в единственное действие оператора [3]. Когда диспетчер выбирает начальный и конечный светофоры, модуль АЗМ берёт управление на себя: анализирует доступные маршруты, проверяет свободу всех блок-участков на выбранном пути, проверяет отсутствие враждебных маршрутов, последовательно переводит и запирает все промежуточные стрелки и только после этого открывает светофор. Последовательность, ранее требовавшая десяти-пятнадцати отдельных ручных шагов, выполняется автоматически за секунды. В таблице 1 представлена последовательность выполнения АЗМ и проверяемые условия безопасности.

Таблица 1 – Последовательность выполнения АЗМ и условия безопасности

Шаг	Действие АЗМ	Проверяемое условие безопасности
1	Оператор выбирает начальный и конечный сигналы	Подтверждение корректности идентификаторов сигналов
2	Система анализирует все возможные маршруты	Граф маршрутов строится на основе топологической модели
3	Проверка рельсовых цепей на выбранном маршруте	Все блок-участки должны быть свободны
4	Проверка враждебных маршрутов	Отсутствие пересекающихся или встречных маршрутов
5	Перевод и запираение всех промежуточных стрелок	Получение подтверждения положения от каждого устройства
6	Открытие разрешающего показания светофора	Все условия шагов 1–5 выполнены

Каждая выданная команда и каждое изменение состояния, зафиксированное системой SCADA, регистрируется с точностью до секунды. Этот архив служит нескольким целям: техническому анализу после инцидентов, доказательной базе для проверок безопасности и источником данных для предиктивного обслуживания [1].

Проблемы традиционных SCADA-систем

Несмотря на широкое применение SCADA в железнодорожной отрасли, традиционные архитектуры несут в себе ряд функциональных недостатков, влияющих как на повседневное удобство работы, так и на запас безопасности [6].

Старые разработки HMI, как правило, размещают большой объём информации на одном экране без чёткой визуальной иерархии. Путьевые объекты на мнемосхемах расположены непоследовательно, цветовые обозначения варьируются от установки к установке, а первичные оперативные данные не отделены от второстепенной информации о состоянии. Практическое следствие — диспетчер тратит больше времени на выяснение реальной обстановки, что замедляет принятие решений и повышает вероятность ошибочной интерпретации экрана в напряжённых ситуациях [4].

Архитектуры на основе циклического опроса вносят неизбежную задержку между реальным изменением состояния и его отображением на экране диспетчера. В сочетании с задержками отклика ПЛК эта задержка может составлять несколько секунд [10]. Для динамичного движения поездов, особенно на станциях с короткими блок-участками, разрыв даже в несколько секунд между физическим положением поезда и его отображением на схеме создаёт реальную оперативную неопределённость.

В системах первого поколения все тревоги представляются оператору одинаковым визуальным и звуковым сигналом вне зависимости от реальной степени серьёзности. Критическое событие — проезд запрещающего сигнала (SPAD) — конкурирует за внимание с записью рутинного журнала. Исследования в области человеческого фактора неизменно показывают, что такое однородное представление ведёт к «усталости от тревог»: операторы начинают игнорировать или откладывать подтверждение тревог, поскольку сигнал утрачивает своё значение [8].

Традиционная активация маршрута требует от оператора выполнения последовательного контрольного списка: каждую стрелку необходимо выбрать, подать команду и получить подтверждение, и только после установки всех стрелок можно открыть светофор [3]. На занятых станциях в часы пик эта последовательная процедура становится узким местом. Любое отступление от предписанного порядка — по спешке или невнимательности — может привести к неверно сформированному маршруту.

Добавление новой рельсовой цепи или светофора в традиционную SCADA, как правило, требует изменений на уровне программного кода, последующей полной сборки системы и остановки для развёртывания обновления [5]. В условиях железнодорожной эксплуатации, требующей доступности системы круглосуточно, это означает, что изменения в топологии накапливаются и выпускаются редкими, рискованными релизами.

Объектно-ориентированные решения на платформе zenon

Платформа zenon решает каждую из проблем, описанных в разделе 4, через сочетание архитектурных решений и конкретных программных возможностей.

Основным строительным блоком модели конфигурации zenon является smart-объект — самодостаточный шаблон, объединяющий все свойства определённого типа оборудования: логику контроля ламп для светофора, обратную связь по положению и замыканию для стрелки, состояние занятости для рельсовой цепи [1]. При добавлении новой станции инженер инстанцирует соответствующие шаблоны и привязывает их к адресам ПЛК. Писать логику с нуля не нужно — поведение уже определено в шаблоне. Внутренние измерения показывают, что такой подход сокращает общее время проектирования примерно на 60% для сопоставимых проектов [1].

Вместо циклического опроса полевых устройств коммуникационный уровень zenon использует событийную модель: как только значение изменяется в ПЛК, обновление «проталкивается» на сервер SCADA с точностью до миллисекунды [1]. Для диспетчера, наблюдающего движение поездов на загруженной станционной мнемосхеме, эта разница ощутима: экран отражает то, что происходит на пути в данный момент.

Поскольку железнодорожные системы работают непрерывно, традиционное требование остановки системы для любого обновления конфигурации оперативно неприемлемо. Функция Online Deployment в zenon позволяет публиковать новые объекты, маршруты или изменения конфигурации в работающей системе без прерывания обслуживания [1]. При обнаружении ошибки после развёртывания возможности Hot Reload и Rollback позволяют немедленно восстановить предыдущую конфигурацию.

Система тревог в предлагаемой архитектуре организует события по трём уровням, каждый с отдельным визуальным представлением и определённым требованием к реакции оператора. Таблица 2 суммирует иерархию. Разделение критических тревог от технических и информационных обеспечивает чёткое выделение событий, требующих немедленного вмешательства [8].

Таблица 2 – Трёхуровневая иерархия тревог и требования к реакции оператора

Уровень	Цвет	Тип события	Требуемое действие
1 — Критический	Красный	Угроза столкновения, проезд запрещающего сигнала (SPAD), несанкционированное движение	Немедленное подтверждение
2 — Технический	Жёлтый	Отказ оборудования, потеря резервного питания, неисправность устройства	Вызов технической службы
3 — Информационный	Синий / серый	Плановые движения поездов, записи журнала, подтверждения статуса	Не требуется

Эффект поддаётся количественной оценке с помощью теории обнаружения сигналов (SDT). Индекс различимости оператора d' определяется как:

$$d' = Z(H) - Z(FA),$$

где H — доля правильно обнаруженных критических событий, FA — доля ложных тревог. Отнесение некритических событий к нижним уровням иерархии снижает FA и тем самым повышает d' , что позволяет диспетчеру сохранять надёжное обнаружение действительно опасных ситуаций даже при высоком общем объёме тревог [8].

Модуль АЗМ в zenon реализует последовательность активации маршрута, описанную в разделе 3.5, как внутренний алгоритм, работающий без участия оператора после выбора начального и конечного светофоров [1]. Алгоритм оценивает реализуемость маршрута, проверяет занятость участков, разрешает конфликты, командует стрелками, ожидает подтверждённой обратной связи и только после этого меняет показание светофора на разрешающее — всё в течение нескольких секунд.

Надёжность и предиктивное техническое обслуживание

Помимо роли инструмента оперативного мониторинга, SCADA-платформа служит непрерывным источником данных об исправности инфраструктуры. Модуль zenon Historian архивирует каждое изменение состояния, команду и измеренное значение с точностью до временной метки, формируя долгосрочную запись поведения каждого путевого устройства [1].

Этот архив является основой для предиктивного обслуживания. Устанавливая базовые характеристики для каждого типа оборудования и отслеживая отклонение отдельных устройств от этих характеристик, служба технического обслуживания может выявлять деградацию до того, как она приведёт к отказу. Таблица 3 показывает контролируемые параметры и признаки неисправностей для четырёх основных категорий оборудования.

Таблица 3 – Параметры предиктивного обслуживания и признаки неисправностей

Объект	Контролируемый параметр	Признак неисправности
Стрелочный привод	Время перевода / пиковый ток	Механический износ или недостаточная смазка
Светофор	Отклонение напряжения / тока	Риск перегорания светодиода или лампы
Рельсовая цепь	Сопротивление шунтирования	Загрязнение балласта или дренажные проблемы
Переезд	Обороты двигателя / температура	Гидравлическая или механическая усталость

Для стрелочных приводов ключевыми индикаторами являются время перевода и пиковый ток двигателя. Привод, которому требуется всё больше времени для завершения хода или который потребляет всё более высокий ток, демонстрирует признаки механического износа или недостаточной смазки — состояние, которое можно устранить в ближайшее плановое окно обслуживания до возникновения отказа в работе. Для рельсовых цепей значение шунтового сопротивления служит ранним предупреждением о загрязнении балласта или дренажных проблемах [3]. Плановое вмешательство в ходе регламентного технического обслуживания несравнимо менее затратно, чем аварийный ремонт во время движения поездов [2].

Сравнительный анализ

Для оценки предлагаемой архитектуры на фоне традиционной практики в таблице 4 представлено структурированное сравнение по ключевым критериям оценки, выявленным в ходе анализа проблем в разделе 4.

Таблица 4 – Сравнение традиционных SCADA-систем и объектно-ориентированной платформы zenon

Критерий	Традиционная SCADA	Платформа zenon
Время проектирования	Высокое — каждый объект кодируется вручную	Сокращение ~60% за счёт шаблонов smart-объектов [1]
Обновление системы	Требует полной остановки [5]	Online Deployment — обновление без остановки, с откатом [1]
Скорость обновления данных	Опрос с периодической задержкой [4]	Событийная модель — точность до миллисекунды [1]
Управление тревогами	Плоский список — без приоритетов [6]	Трёхуровневая иерархия — критич./техн./инф. [8]
Задание маршрута	10–15 ручных последовательных шагов [4]	Автоматическое — выбор начала и конца [3]
Предиктивное обслуживание	Не поддерживается [5]	Модуль Historian — непрерывное архивирование [1]
Расширяемость	Требуются изменения в коде [5]	Модульная — новые объекты без изменения кода [1]

Сравнение показывает, что преимущества архитектуры zenon — не незначительные улучшения, а структурные изменения, затрагивающие весь жизненный цикл проектирования и эксплуатации. Переход от кодового к шаблонному управлению объектами, от опроса к событийной коммуникации и от плоского к иерархическому представлению тревог решает конкретные задокументированные проблемы традиционных реализаций [6]. В совокупности они обеспечивают систему, которую быстрее строить, легче обслуживать, прозрачнее эксплуатировать и которая лучше приспособлена к росту вместе с обслуживаемой сетью.

Заключение

В данной статье представлено функциональное проектирование и архитектурное обоснование объектно-ориентированной SCADA-платформы для железнодорожной сигнализации, реализованной на программной платформе zenon. Работа обусловлена рядом хорошо известных проблем традиционных SCADA: когнитивной перегрузкой из-за перегруженных интерфейсов, задержками обновления состояний, однородным представлением тревог, ручными процедурами задания маршрутов и жёсткими циклами обновлений — каждая из которых устранена конкретной архитектурной возможностью предлагаемой системы [4][6].

Шаблоны smart-объектов сокращают время проектирования примерно на 60% и отделяют изменения топологии от модификаций кода [1]. Событийное коммуникационное ядро устраняет задержки опроса. Трёхуровневая иерархия тревог существенно снижает долю ложных тревог [8]. Модуль АЗМ автоматизирует последовательность из десяти-пятнадцати ручных шагов, устраняя значимый источник ошибок оператора [3]. Модуль Historian преобразует SCADA-платформу из инструмента мониторинга в непрерывный источник данных об исправности инфраструктуры для обслуживания по техническому состоянию [2].

Собранные данные подтверждают, что гибкая объектно-ориентированная SCADA-архитектура является не перспективным направлением, а практической необходимостью для любой современной системы железнодорожной сигнализации. Для сетей, переходящих к подвижно-блочному регулированию, автономному управлению движением или интеграции цифровых двойников, описанная архитектурная основа обеспечивает масштабируемую и удобную в обслуживании платформу [9].

Дальнейшие исследования будут направлены на количественную оценку операционного воздействия описанных возможностей посредством контролируемых

полевых измерений, расширение платформы предиктивного обслуживания методами машинного обучения для обнаружения аномалий, а также оценку интеграции платформы с коммуникационной инфраструктурой FRMCS на базе 5G.

Заявление о доступности данных

Данные, подтверждающие результаты настоящего исследования, доступны у соответствующего автора по обоснованному запросу с учётом ограничений конфиденциальности и безопасности, применимых к конфигурациям систем железнодорожной сигнализации и SCADA.

Литература

1. COPA-DATA. Программная платформа zenon — Рекламный проспект продукта. — COPA-DATA GmbH, Зальцбург, 2023. — URL: <https://www.copadata.com> (дата обращения: 20.01.2026).
2. Dev, M. Digital twins in rail and metro / M. Dev // AEC Forum 2025. — Geospatial World, 2025. — URL: <https://geospatialworld.net/aec-forum/2025/presentations/rail-and-metro/s1/Mangal-Dev.pdf> (дата обращения: 20.01.2026).
3. International Electrotechnical Commission. IEC 62290: Urban rail transit — Command, control and protection systems. Part 1. — Geneva : IEC, 2014.
4. Schukat, M. An overview of SCADA systems / M. Schukat, A. Cahill, L. McKenna // Proceedings of the IET Irish Signals and Systems Conference (ISSC). — Galway, 2008. — P. 162–167.
5. Spherical Insights. Global Railway Signaling Systems Market Size, Share, and Trends Analysis Report 2024–2035. — Spherical Insights, 2024. — URL: <https://www.sphericalinsights.com> (дата обращения: 20.01.2026).
6. Zurawski, R. Industrial Communication Technology Handbook / R. Zurawski. — 2nd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2015.
7. Tomar, I. Real time control system for metro railways using PLC and SCADA / I. Tomar, I. Sreedevi, N. Pandey // Intelligent Automation and Soft Computing. — 2023. — Vol. 35, № 2. — P. 1403–1421. — DOI: 10.32604/iasc.2023.028163.
8. Hollifield, B. The Alarm Management Handbook / B. Hollifield, D. Oliver, I. Nimmo, E. Habibi. — Houston : PAS, 2008.
9. Benavente-Peces, C. Securing the future of railway systems / C. Benavente-Peces, M. O. Pahl // Sensors. — 2024. — Vol. 24, № 8218. — DOI: 10.3390/s24248218.
10. Stouffer, K. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security / K. Stouffer, J. Falco, K. Scarfone. — NIST Special Publication 800-82 Rev. 3. — Gaithersburg : NIST, 2023. — DOI: 10.6028/NIST.SP.800-82r3.