ISSN: 3030-3346

УСТРОЙСТВО ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СМЕЩЕНИЙ ПРОЛЁТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Алимджанов Хаёт Фархадович

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий

K E Y W O R D S

пролётные конструкции, мостовые сооружения, дистанционный мониторинг, смещение, оптоэлектронный датчик, ZigBee, GSM

A B S T R A C T

Разработаны модель и алгоритм работы устройства дистанционного мониторинга относительных смещений пролётных конструкций мостовых сооружений с применением радиотехнологий. Предложенная модель объединяет измерительные каналы, средства мультиплексирования и аналого-цифрового преобразования, микроконтроллерные узлы, подсистему управления питанием, резервную память, модуль определения координат и времени, а также средства беспроводной передачи данных. Для контроля пространственных смещений предусматривается совместное использование оптоэлектронного датчика по осям *X* и *Y* и датчика расстояния по координате *Z*. Параметры температуры *T*, влажности *H* и вибрационного воздействия *a* используются на этапе предварительной обработки измерительной информации для учёта влияния внешней среды и кратковременных динамических нагрузок, способных вызвать ложную интерпретацию состояния конструкции. Предложена двухуровневая архитектура связи, предусматривающая локальный обмен между измерительными узлами и головным узлом по технологии *ZigBee* и последующую передачу диагностической информации в центр мониторинга через *GSM*-модуль и мобильную сеть. Алгоритм работы устройства включает начальную инициализацию, самодиагностику, проверку связи, восстановление после сбоя, циклический опрос датчиков по заданному таймером интервалу, обработку измерительных данных, сравнение полученных значений с установленными порогами, классификацию состояния как нормального, предаварийного или аварийного и формирование соответствующего сообщения. При нарушении канала связи предусматривается локальное резервирование данных с последующей передачей после восстановления соединения. Экспериментальные результаты подтверждают возможность регистрации относительных смещений по трём координатам и практическую применимость разработанного устройства как элемента системы дистанционного мониторинга пролётных конструкций.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация мостовых сооружений требует не только периодического обследования, но и получения измерительной информации между осмотрами. Одним из параметров изменения технического состояния пролётной конструкции является относительное смещение её элементов. При этом измеренное датчиком отклонение не всегда связано с развитием опасной деформации. На результаты влияют температурно-влажностные условия, разного рода вибрации и кратковременные динамические нагрузки от транспортного потока. Поэтому, задача дистанционного мониторинга заключается в совместном решении вопросов регистрации пространственного смещения, предварительной обработки измерений с учётом влияющих факторов и гарантированной доставки информации в центр мониторинга.

Современные SHM-системы развиваются в направлении интеграции сенсорных технологий, беспроводной передачи, предобработки данных и раннего предупреждения. Обзор Zhang et al. показывает, что беспроводная передача и обработка данных являются самостоятельными звеньями современной архитектуры мониторинга мостов

(cc) BY

[1]. Deng et al. систематизируют развитие сенсорных и компьютерно-зрительных технологий, методов шумоподавления и раннего предупреждения [2]. В работах по измерению перемещений показана эффективность бесконтактных оптических методов [3, 4], а гибридное использование ускорений и деформаций позволяет отделять динамические компоненты и уменьшать влияние дрейфа и возмущений [5]. Вместе с тем переход от отдельного измерительного канала к автономному устройству, которое объединяет многоканальный сбор данных, локальную обработку, резервирование, координатно-временную привязку и двухуровневую радиопередачу, требует отдельной аппаратно-алгоритмической проработки.

Цель исследования - разработка модели и алгоритма работы устройства дистанционного мониторинга смещений пролётных конструкций, обеспечивающего измерение по трём координатам (*X*, *Y* и *Z*), учёт влияния параметров температуры (*T*), влажности (*H*) и вибрации (*a*) на объект диагностики, локальную обработку, пороговую оценку состояния и передачу диагностической информации по двухуровневому радиоканалу.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- - сформирована функциональная модель устройства;
- - определена структура измерительных и микроконтроллерных узлов;
- - предложена двухуровневая схема радиопередачи ZigBee–GSM; разработан алгоритм циклической диагностики с самоконтролем и восстановлением после сбоя;
- - предусмотрены резервное хранение данных, GPS-привязка и изменение режима диагностики при предаварийном и аварийном состояниях;
- - выполнена экспериментальная проверка основных измерительных каналов.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

Выполненный анализ научных работ за последние годы показывает устойчивый переход от отдельных измерительных приборов к интегрированным системам структурного мониторинга. В научных работах, посвящённых системам мониторинга, сенсорный уровень, передачу данных, предобработку, идентификацию дформаций и раннее предупреждение рассматривают как взаимосвязанные компоненты SHM [1, 2]. Для крупных сооружений особенно важна масштабируемость сети, при которой увеличение числа контролируемых узлов не требует пропорционального увеличения количества проводных коммуникационный линий.

Оптические методы позволяют выполнять дистанционное измерение смещений. Chu et al. предложили синхронный многоточечный мониторинг по визуальным признакам поверхности [3], а Dong et al. продемонстрировали применение компьютерного зрения на многопролётных мостах [4]. Однако оптические измерения чувствительны к условиям наблюдения и внешней среде. Wen et al. отдельно рассматривают влияние температуры и влажности на неопределённость измерений компьютерного зрения [6]. Это подтверждает необходимость включать параметры среды в обработку измерительной информации, а не интерпретировать первичные значения смещений изолированно.

Для динамических воздействий перспективным является совместное использование разнородных каналов. Zeng et al. объединяют ускорения и деформации для оценки перемещений в реальном времени [5]. Mo et al. показывают необходимость адаптивного шумоподавления при мониторинге перемещений по спутниковым измерениям [7]. В беспроводной части SHM применяются ZigBee, Wi-Fi, LoRa, NB-IoT и мобильные сети; обзор интегрированного мониторинга мостов рассматривает эти технологии как взаимодополняющие варианты передачи [8]. Для распределённого объекта практический

(cc) BY

интерес представляет иерархическая организация связи, когда энергоэффективная локальная сеть объединяет сенсорные узлы, а шлюз использует дальний канал для связи с сервером.

Предыдущие авторские разработки последовательно развивали функциональную схему устройства дистанционного мониторинга стыков мостовых сооружений, применение ZigBee для беспроводной сенсорной сети и веб-интерфейс дистанционного наблюдения [9-11]. Настоящая работа развивает это направление на уровне целостной модели устройства и алгоритма его функционирования, связывая измерительные каналы, вычислительные узлы, питание, память, позиционирование и радиопередачу.

МЕТОДОЛОГИЯ

Объектом исследования являются пролётные конструкции мостовых сооружений, контролируемые по относительным смещениям между выбранными участками. Предмет исследования - функциональная организация устройства, алгоритм его работы и взаимодействие измерительных, вычислительных и радио модулей. Основными диагностическими параметрами являются X, Y и Z, корректирующими параметрами - температура T, влажность H и вибрационное воздействие a.

Для X и Y используется оптоэлектронный принцип: положение лазерного пятна регистрируется приёмной фоторезисторной матрицей 5×5. Изменение положения пятна относительно исходной области соответствует направлению и величине относительного смещения. Координата Z определяется отдельным дальномерным каналом. Такой подход позволяет разделить плоскостные X-Y и продольные/дальномерные Z измерения внутри единого измерительного модуля.

Температура и влажность учитываются как параметры, способные изменять как состояние конструкции, так и характеристики измерительного тракта. Вибрация a используется как признак кратковременного динамического воздействия. При прохождении тяжёлого транспортного средства мгновенное отклонение не должно автоматически трактоваться как устойчивое опасное смещение. Поэтому пороговое решение формируется после предварительной обработки данных. В общей форме температурно-влажностная компенсация может быть представлена как;

$$\Delta x_i^{\text{ком}} = k_x(T_i, H_i) \cdot \Delta x_i^{\text{пер}} + b_x(T_i, H_i) \quad (1)$$
$$\Delta y_i^{\text{ком}} = k_y(T_i, H_i) \cdot \Delta y_i^{\text{пер}} + b_y(T_i, H_i) \quad (2)$$
$$\Delta z_i^{\text{ком}} = k_z(T_i, H_i) \cdot \Delta z_i^{\text{пер}} + b_z(T_i, H_i) \quad (3)$$

где $k_{x,y,z}(T_i, H_i)$ - коэффициенты компенсации (влияние температуры и влажности на расширение конструкции), $b_{x,y,z}(T_i, H_i)$ - аддитивные поправки нулевого уровня, учитывающие дрейф и смещение измерительного канала. Функции $k(\cdot)$, $b(\cdot)$ определяются калибровкой. Для динамической составляющей применяется рекуррентное сглаживание с коэффициентом, зависящим от уровня вибрации a.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основным результатом исследования является разработанная модель устройства дистанционного мониторинга смещений пролётных конструкций (рис.1). В отличие от представления устройства как отдельного датчика, модель охватывает полный аппаратный узел (группы сенсоров, тракты преобразования сигналов, микроконтроллеры, GPS-модуль, резервную память, управление питанием и радиомодули для передачи данных).

(cc) BY

ISSN: 3030-3346

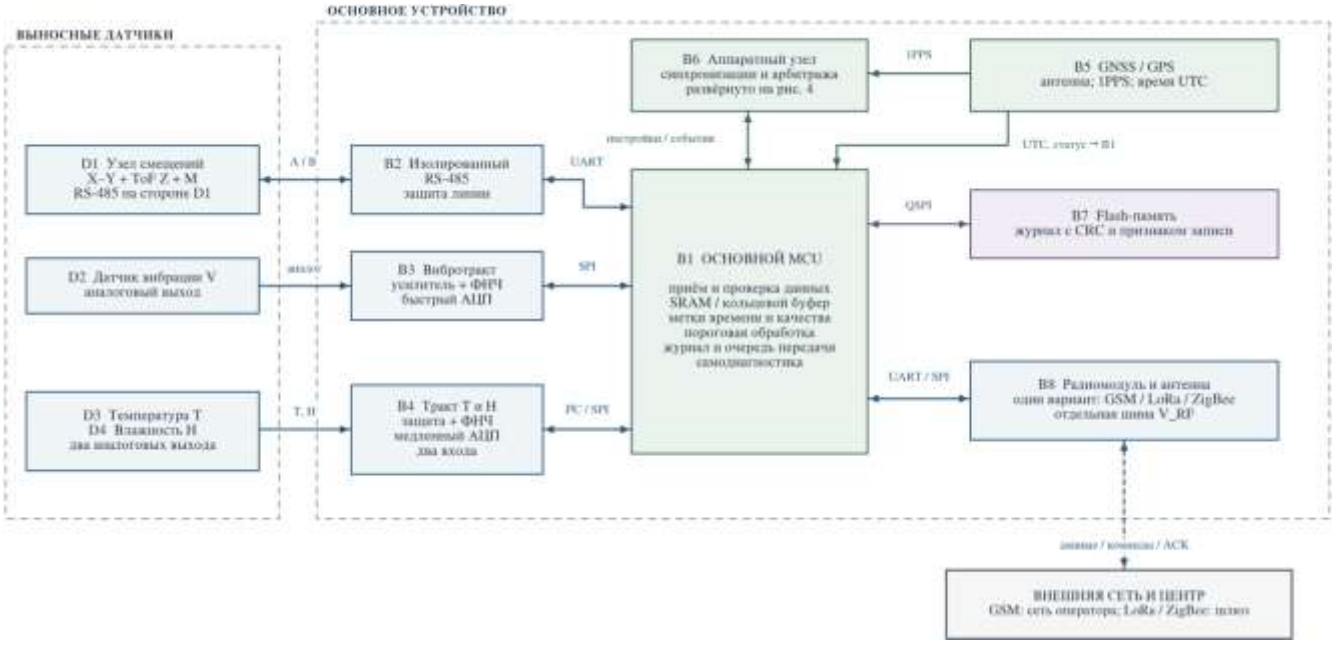


Рис.1. Модель устройства дистанционного мониторинга смещений пролётных конструкций

Измерительный блок объединяет узел смещений D1 и датчики D2-D4, непосредственно взаимодействующие с объектом и окружающей средой. Узел D1 имеет две механические базы по разные стороны стыка. На первой закреплены лазерный излучатель канала X-Y и пассивная мишень ToF, на второй - фоторезисторная матрица, ToF-сенсор и локальный микроконтроллер M. Перемещение светового пятна характеризует изменение взаимного положения баз в плоскости матрицы; ToF-канал определяет расстояние до мишени.

Локальный M опрашивает матрицу и ToF-сенсор, проверяет пригодность отсчётов и формирует пакет координатных данных. Размещение цепей опроса рядом с матрицей ограничивает длину её аналоговых соединений. Для выбранного класса ToF-сенсоров управление измерением и чтение результатов могут выполняться по локальной шине I²C. Изменение дальности интерпретируется как смещение Z в пределах допустимой монтажной геометрии; угловые отклонения баз требуют отдельной оценки.

D2 регистрирует вибрацию, D3 - температуру, D4 - влажность воздуха. Их аналоговые выходы поступают на входные тракты ОБ. Поэтому выход ИБ содержит как цифровые данные D1, так и аналоговые сигналы D2–D4. Обобщённая стрелка ИБ → ОБ обозначает направление передачи измерительной информации, а не единый тип интерфейса или один провод.

Коммуникационная часть построена по двухуровневому принципу. На локальном уровне измерительные узлы пролётов передают данные в *Head Cluster* по *ZigBee*. На магистральном уровне головной узел через *GSM/SIM800L* использует мобильную сеть для передачи агрегированной информации в центр мониторинга. Такая организация ориентирована на многопролётные сооружения: локальные узлы не требуют индивидуального дальнего радиоканала, а функции внешней связи концентрируются в головном узле.

(cc) BY dtai.uz

ISSN: 3030-3346

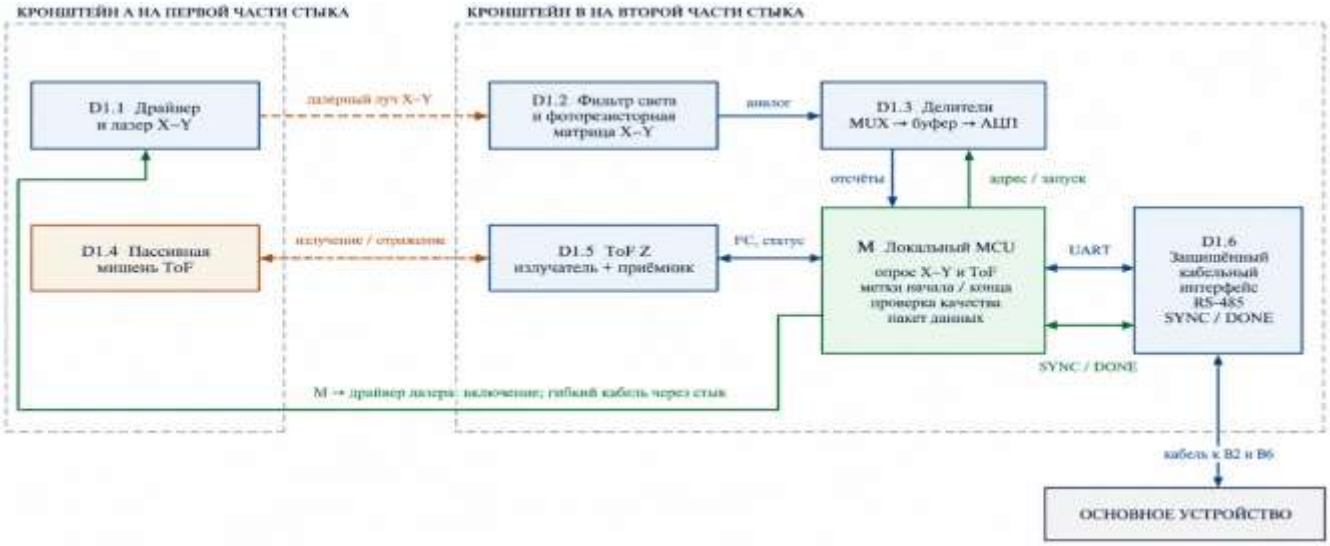


Рис.2. Конструктивно-функциональная реализация измерительного модуля X, Y, Z

Ключевым измерительным элементом является оптоэлектронный модуль, в котором лазерный источник, установленный на одном контролируемом участке, формирует пятно на фоторезисторной матрице 5×5 противоположного участка (рис.2). Смещение пятна относительно исходного положения используется для определения *X* и *Y*, а канал *Z* реализуется отдельным датчиком расстояния. Такое разделение позволяет регистрировать пространственное относительное смещение в едином диагностическом цикле.

Вторым главным результатом является алгоритм работы устройства (рис.3). Он связывает аппаратную модель с диагностической логикой и задаёт порядок функционирования от включения питания до передачи данных и изменения режима наблюдения.

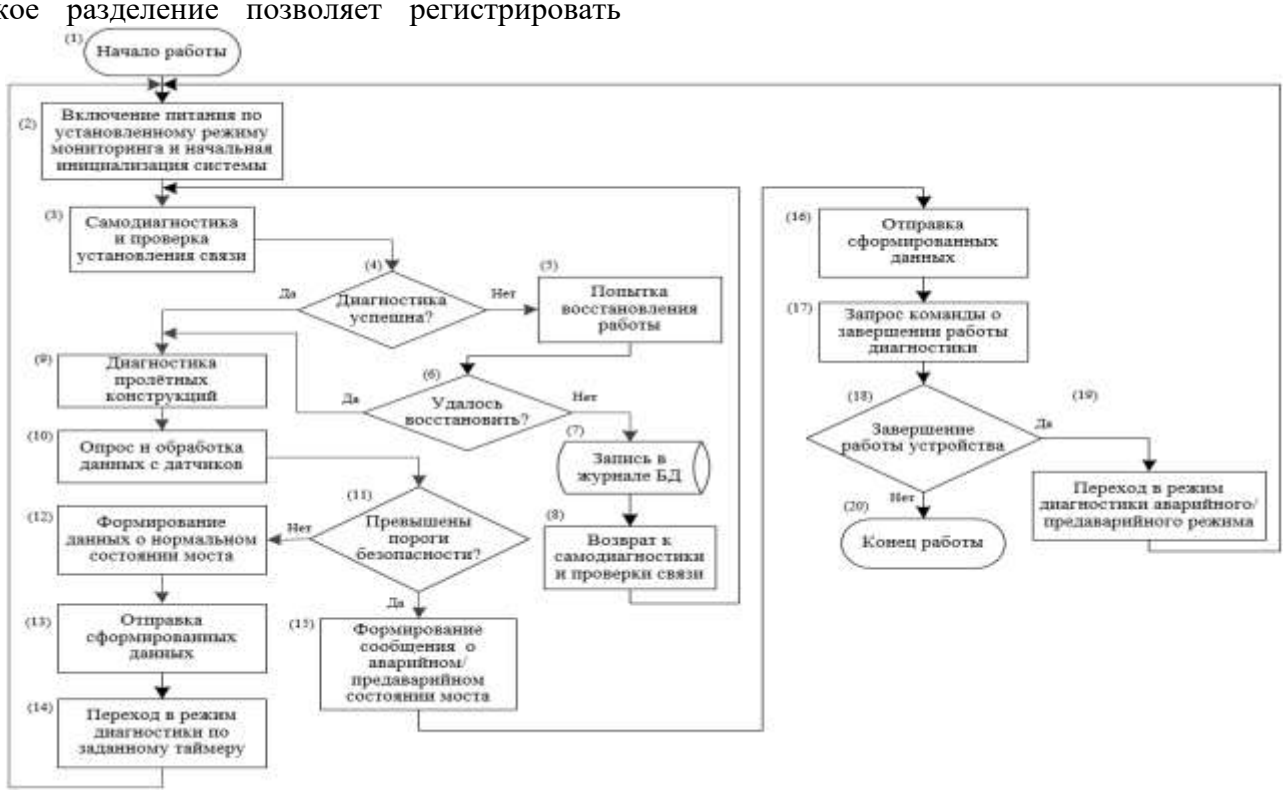


Рис.3. Алгоритм работы устройства дистанционного мониторинга смещений пролётных конструкций

(cc) BY

После включения питания и инициализации выполняется самодиагностика и проверка установления связи. При обнаружении неисправности инициируется попытка восстановления; если восстановление не удалось, событие записывается в журнал базы данных и цикл самодиагностики повторяется. При успешной диагностике устройство переходит к контролю пролётной конструкции. Блок «Опрос и обработка данных с датчиков» включает получение *X*, *Y*, *Z* и сопутствующих *T*, *H*, *a*, предварительную обработку и подготовку значений к пороговой оценке.

Если пороги безопасности не превышены, формируются данные о нормальном состоянии, информация передаётся, после чего устройство возвращается к диагностике по заданному таймеру. При превышении порогов формируется сообщение о предаварийном или аварийном состоянии. После передачи соответствующих данных система запрашивает команду о завершении работы; при продолжении мониторинга устройство переходит в режим повышенной частоты диагностики и возвращается к циклу. Такая логика обеспечивает не только обнаружение события, но и изменение интенсивности наблюдения в зависимости от состояния объекта.

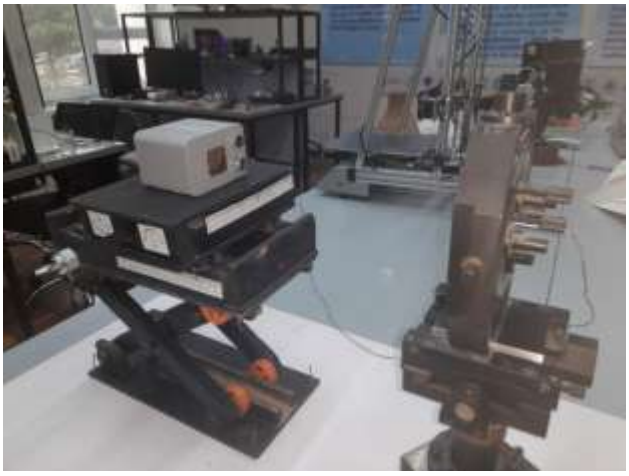




Рис.4. Тестирование в лабораторных условиях прототипа датчика смещений пролётных конструкций

Экспериментальные материалы используются в настоящей работе как подтверждение работоспособности измерительного принципа, без расширения выводов за пределы исходных испытаний.

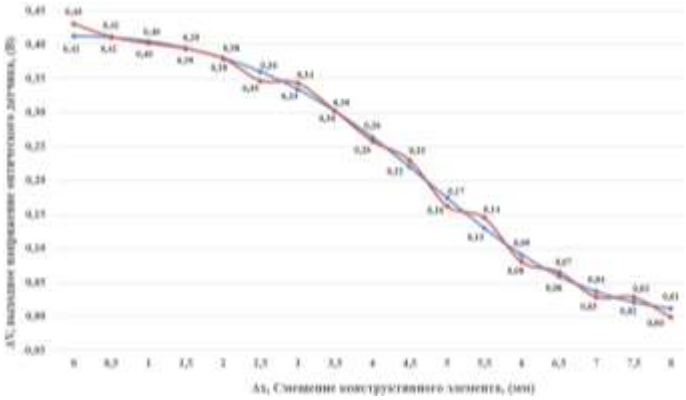


Рис.5. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимости полезного сигнала оптического канала ΔV от смещения конструкции Δx

Эти результаты подтверждают возможность применения разработанного устройства для регистрации относительных смещений по трём координатам, однако не заменяют натурную метрологическую валидацию на мостах различных типов.

Дополнительная визуализация работы устройства в центре мониторинга приведена на рис.6. График по оси *X* показывает развитие статического смещения и переход через

(cc) BY dtai.uz

настраиваемые предаварийный и аварийный пороги.

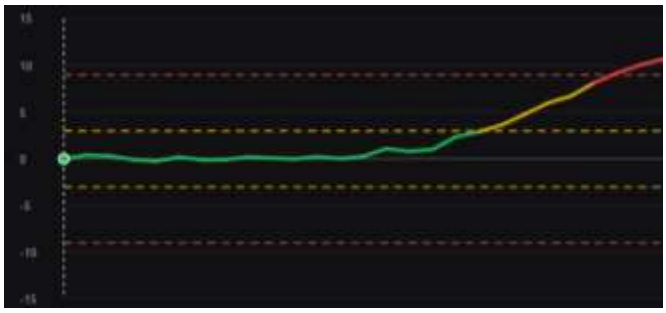


Рис.6. График показателя смещения по оси X

На графике отображается изменение относительного смещения пролётной конструкции по оси *X* во времени. При нахождении измеренного значения в пределах установленного диапазона нормального состояния линия отображается зелёным цветом. При превышении первого порогового значения X_1 линия изменяет цвет на жёлтый, что соответствует предаварийному состоянию. При достижении или превышении второго порогового значения X_2 линия отображается красным цветом, указывая на переход контролируемого узла в аварийное состояние. Аналогичное графическое отображение предусмотрено для контроля смещений по осям *Y* и *Z*.

При отсутствии смещения лазерное пятно располагается в центральной области фоторезисторной матрицы, что соответствует нормальному состоянию контролируемого узла. При возникновении относительного смещения пролётных конструкций положение лазерного пятна изменяется в соответствующем направлении по координатам *X* и *Y* (рис.7).

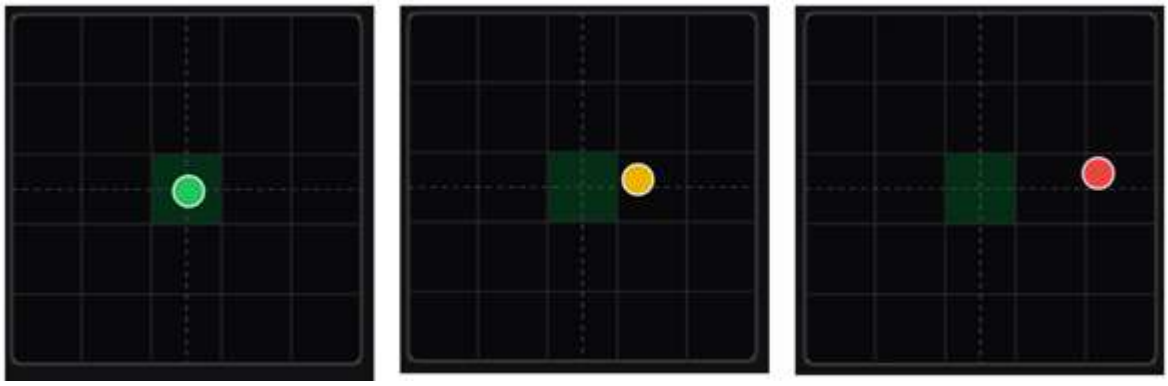


Рис.7. Изменение положения лазерного пятна на фоторезисторной матрице при смещении

Одновременно цветовая индикация точки изменяется в зависимости от величины смещения. Зелёный цвет соответствует нормальному состоянию, жёлтый - достижению предаварийного уровня, красный - аварийному состоянию. Такое представление позволяет визуально определить, как направление смещения, так и его принадлежность к установленному диапазону состояния конструкции.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная модель отличается тем, что устройство рассматривается не как одиночный измерительный преобразователь, а как автономный распределённый аппаратно-программный узел. Такое представление позволяет согласовать физическое измерение смещения с задачами эксплуатации: синхронизацией, резервированием данных, автономным питанием и передачей информации. Особенно важна двухуровневая сеть передачи данных. При большом числе пролётов установка каждого сенсорного узла отдельным *GSM*-модулем увеличивает аппаратную сложность и энергопотребление, локальная *ZigBee*-сеть позволяет передавать данные в Head Cluster, оставляя передачу данных в центр мониторинга одному *GSM*-модулю.

(cc) BY dtai.uz

Роль *T*, *H* и *a* принципиально отличается от роли *X*, *Y* и *Z*. Первые не являются самостоятельными признаками пространственного смещения, а используются для повышения корректности интерпретации основных измерений. Температура и влажность связаны с медленными средовыми изменениями, а вибрация - с кратковременной динамической реакцией. Поэтому их включение в измерительный цикл снижает риск ситуации, когда эксплуатационный отклик конструкции ошибочно трактуется как устойчивое предаварийное или аварийное смещение.

Резервная память и привязка *GPS*-модуля повышают прослеживаемость событий. При отсутствии связи с центром мониторинга, аварийное данные не теряется, а сохраняются локально, вместе со временем и координатами объекта. После восстановления связи последовательность событий может быть передана в центр мониторинга. Это особенно важно для распределённой инфраструктуры, где оператор должен однозначно определить не только величину отклонения, но и место и время его возникновения.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Предлагаемая структура может быть использована при создании локальных узлов непрерывного мониторинга многопролётных мостов. Настраиваемые пороги позволяют адаптировать устройство к расчётным допустимым перемещениям конкретной конструкции. Локальная *ZigBee*-сеть уменьшает необходимость в дальнем радиомодуле на каждом сенсорном узле, а *GSM*-канал *Head Cluster* обеспечивает передачу в удалённый центр. Резервная память поддерживает накопление данных при временной недоступности сети, а *GPS* обеспечивает идентификацию объекта и временную синхронизацию. Интерфейс центра мониторинга может отображать историю *X*, *Y*, *Z*, *T*, *H* и *a*, положение лазерного пятна и изменение класса состояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модель устройства дистанционного мониторинга смещений пролётных конструкций с применением радиотехнологий. Модель объединяет измерительные, вычислительные, энергетические, навигационные, запоминающие и коммуникационные компоненты в одном функциональном контуре. Основные смещения *X* и *Y* определяются оптоэлектронным датчиком, *Z* – датчиком расстояния, параметры *T*, *H* и *a* используются при предварительной обработке для повышения достоверности интерпретации измерений.

Разработан алгоритм функционирования устройства, предусматривающий включение и инициализацию, самодиагностику и восстановление, циклический опрос датчиков, обработку данных, сравнение с порогами, формирование нормального, предаварийного или аварийного сообщения, передачу информации и изменение режима диагностики. При сбое связи данные сохраняются в резервной памяти, а *GPS-модуль* обеспечивает координатную и временную привязку события.

Для масштабирования на многопролётные мосты предложена двухуровневая радиокоммуникационная архитектура, *ZigBee* на локальном уровне и GSM/мобильная сеть между *Head Cluster* и центром мониторинга. Эксперименты подтверждают возможность измерения пространственных смещений; достигнутая точность составляет ±0,5 мм для *X*–*Y* и ±1 мм для *Z*. Дальнейшие исследования должны быть направлены на проведение длительных испытаний устройства с использованием измерительных приборов, а также на оценку устойчивости его работы при реальных климатических и транспортных воздействиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang B. et al. A review of methods and applications in structural health monitoring (SHM) for bridges //Measurement. – 2025. – Т. 245. – P.116575.

(cc) BY

2. Deng Z. et al. The current development of structural health monitoring for bridges: A review //Buildings. – 2023. – Т. 13. – №. 6. – P.1360.
3. Chu X. et al. Multi-point displacement synchronous monitoring method for bridges based on computer vision //Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – №. 11. – P.6544.
4. Sonbul O.S., Rashid M. Towards the structural health monitoring of bridges using wireless sensor networks: A systematic study //Sensors. – 2023. – Т. 23. – №. 20. – P.8468.
5. Zeng K. et al. Sensing mechanism and real-time bridge displacement monitoring for a laboratory truss bridge using hybrid data fusion //Remote Sensing. – 2023. – Т. 15. – №. 13. – P.3444.
6. Wen H., Dong P., Dong R. The uncertainty analysis of bridge displacement in computer vision //Measurement. – 2023. – Т. 221. – P.113559.
7. Hou Z., Bao L. Research and design of bridge distributed monitoring system based on LoRa technology //IET wireless sensor systems. – 2023. – Т. 13. – №. 3. – P.91-103.
8. He Z. et al. Integrated structural health monitoring in bridge engineering //Automation in construction. – 2022. – Т. 136. – P.104168.
9. Алимджанов Х.Ф., Мирзабабаева М.Ф. Функциональная схема устройства дистанционного мониторинга состояния стыков мостовых сооружений // Иқтисодиёт тармоқларининг инновацион ривожланишида ахборот-коммуникация технологияларининг аҳамияти» Республика илмий-техник анжуманининг маърузалар тўплами 2-қисм. Тошкент, 2021. 42–43 бет.
10. X.F. Alimdjanov, “Использование технологии ZigBee для создания системы мониторинга состояния мостов”, in Proc. International Conference “Recent Advances in Intelligent Information and Communication Technologies (ISPC-2022)”, Tashkent, Uzbekistan, Nov. 23–24, 2022, pp. 361-363.
11. Алимджанов Х.Ф. Система дистанционного мониторинга железобетонных конструкций с применением технологии ZigBee // “Muhammad al-Xorazmiy avlodlari” ilmiy-amaliy va axborot-tahliliy jurnal, № 1 (27)-son, 2024. 128-131 bet.

(cc) BY