

УДК 681.518.3

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/robots/1111.html>

СОЗДАНИЕ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Д.С. Новик

rezomatrix96@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Рассмотрена разработка системы детектирования и классификации повреждений линий электропередач (ЛЭП) с использованием многофункциональных сенсоров, включая RGB-камеру, тепловизор и пассивный радар в виде мехатронного модуля. Проанализированы существующие системы для мониторинга ЛЭП, показаны их недостатки. Предложен новый подход, который включает создание мехатронного модуля для автоматического распознавания повреждений на ЛЭП и применение беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с большой полезной нагрузкой, оснащенного сенсорами различного типа. Представлена методология создания структуры мехатронного модуля. Описаны методы детектирования повреждений и система управления БПЛА, сформулированы требования к системе управления.

Ключевые слова: линии электропередач, беспилотный летательный аппарат, мехатронный модуль, многофункциональные сенсоры, тепловизор, пассивный радар, компьютерное зрение, нейронные сети, диагностика инфраструктуры, детектирование повреждений

Введение. Проблема мониторинга различных инфраструктурных объектов, в том числе энергетических, с каждым днем становится все более актуальной. Это связано с их масштабной модернизацией по всей стране. Особенности мониторинга подобных объектов в нашей стране обусловлены большой протяженностью инфраструктурных объектов и наличием огромных пространств с отсутствием какой-либо инфраструктуры, позволяющей оперативно проводить осмотр объектов на большом удалении от населенных пунктов. К числу таких объектов относятся, в частности, линии электропередачи (ЛЭП) [1].

Для решения современных задач мониторинга состояния ЛЭП необходимо обеспечить высокую точность, надежность и устойчивость к внешним факторам, включая погодные условия, время суток и электромагнитные помехи. Традиционные методы, основанные на применении одного типа сенсоров (например, камер видимого спектра), имеют ограничения: они чувствительны к недостаточной освещенности, туману, осадкам или неспособны выявлять скрытые дефекты, такие как перегрев проводов или коронные разряды (рис. 1).



Рис. 1. Вид ЛЭП в тепловизионном сенсоре

В этой связи возникает необходимость разработки инновационного подхода, основанного на одновременном использовании разнотипных сенсоров — камеры видимого спектра, тепловизора и пассивного радара, устанавливаемых в мехатронном модуле на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Интеграция данных с этих сенсоров в единый мехатронный модуль с применением методов микширования данных позволяет существенно повысить эффективность обнаружения, диагностики и мониторинга ЛЭП. Особенно актуальна задача автономного распознавания повреждений ЛЭП в условиях отсутствия связи с оператором БПЛА [2].

Обоснование структуры мехатронного модуля. Мехатронный модуль будет представлять собой двухосевой привод, оснащенный блоком сенсоров, который состоит из RGB-камеры, тепловизора, фотоаппарата и пассивного радара. Также в модуль будет входить высокопроизводительная система обработки данных для детектирования повреждений ЛЭП, системы управления низкого и высокого уровня [3]. Система должна иметь четыре линии для получения входных данных о положении исследуемого объекта: от системы инерциальных датчиков, системы технического зрения, тепловизионного сенсора и радара. Также система должна иметь постоянный высокоскоростной канал для передачи данных системе навигации и видеоизображения для передачи оператору БПЛА (рис. 2).

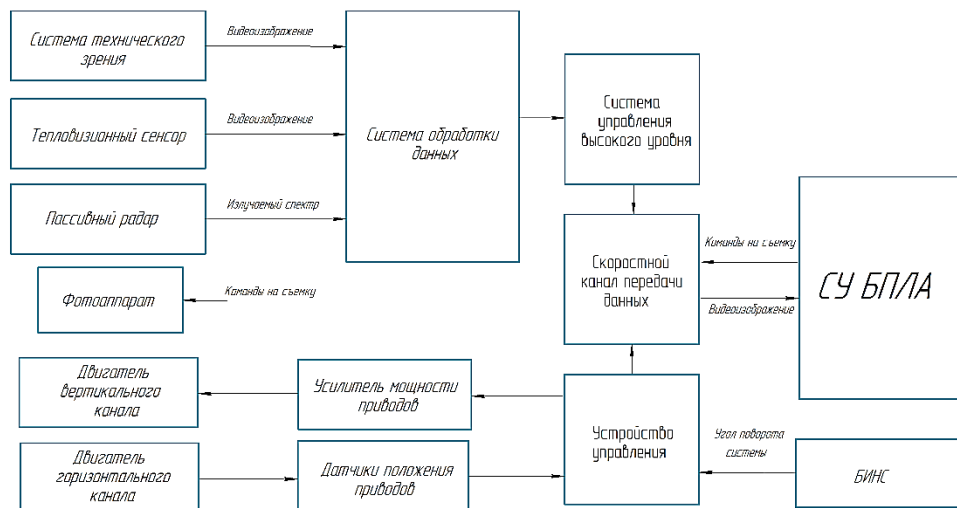


Рис. 2. Структура мехатронного модуля

В роли основной нагрузки выступает блок сенсоров с камерами, радаром и блоком обработки данных [4]. В блок сенсоров должны входить перечисленные ниже компоненты.

1. *Камера видимого спектра.* Обеспечивает высокое разрешение и детализацию изображения при хороших условиях освещения. Камера незаменима для визуального анализа физического состояния проводов, изоляторов и опор, выявления механических повреждений или загрязнений. Однако ее эффективность снижается в условиях плохой видимости (ночь, туман).

2. *Тепловизор.* Регистрирует тепловое излучение объектов, что позволяет выявлять перегрев проводов, неисправности в соединениях или изоляторах, которые невозможно обнаружить визуально. Тепловизионные данные особенно ценны для диагностики скрытых дефектов, но они не дают информации о физическом состоянии объектов.

3. *Пассивный радарный элемент.* Обеспечивает обнаружение искрения проводки ЛЭП в результате спектрального анализа. Этот элемент устойчив к погодным условиям и может работать в условиях нулевой видимости, дополняя оптические сенсоры и обеспечивая позиционирование ЛЭП в сложных ландшафтах.

Каждый из перечисленных сенсоров обладает уникальными преимуществами, но их индивидуальное использование не позволяет получить полную картину состояния объекта. Комбинирование данных с разнородных источ-

ников через мехатронный модуль решает эту проблему, создавая синергетический эффект (рис. 3).

Система также должна обладать собственным вычислителем для реализации автономного детектирования повреждений на ЛЭП посредством оптических сенсоров в совокупности с радаром в результате микширования данных. При этом значимое место имеет структура и центральный процессор вычислителя, к которому предъявляют требования по энергоэффективности и производительности. Возможность получения данных сразу с нескольких специализированных высокоскоростных каналов и высокая устойчивость к электромагнитным помехам достигается благодаря разработке собственного одноплатного компьютера как системы управления высокого уровня и вычислителя системы технического зрения.

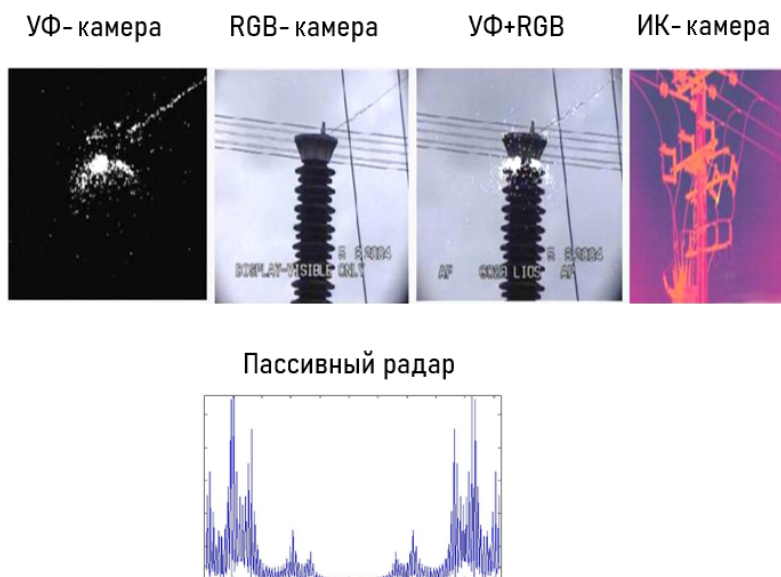


Рис. 3. Показания сенсоров различного типа при повреждении ЛЭП

Представленные на рынке одноплатные компьютеры имеют либо недостаточную производительность для реализации нейросетевого алгоритма распознавания (Raspberry Pi4/5) [5, 6], либо избыточную вычислительную мощность в условиях ограниченного энергопотребления и температурные ограничения работы (Nvidia Jetson). Для реализации одноплатного компьютера был выбран микропроцессор STM32MP257 от STMicroelectronics. Этот

процессор оснащен двумя ядрами Cortex-A35, работающими на частоте 1,5 ГГц, ядром Cortex-M33, а также нейронным процессором (NPU) с производительностью 1,35 TOPS. Данный процессор подходит для одновременной обработки данных с блока сенсора, работы алгоритма управления приводами, а также передачи данных на систему управления БПЛА и модем связи (рис. 4).

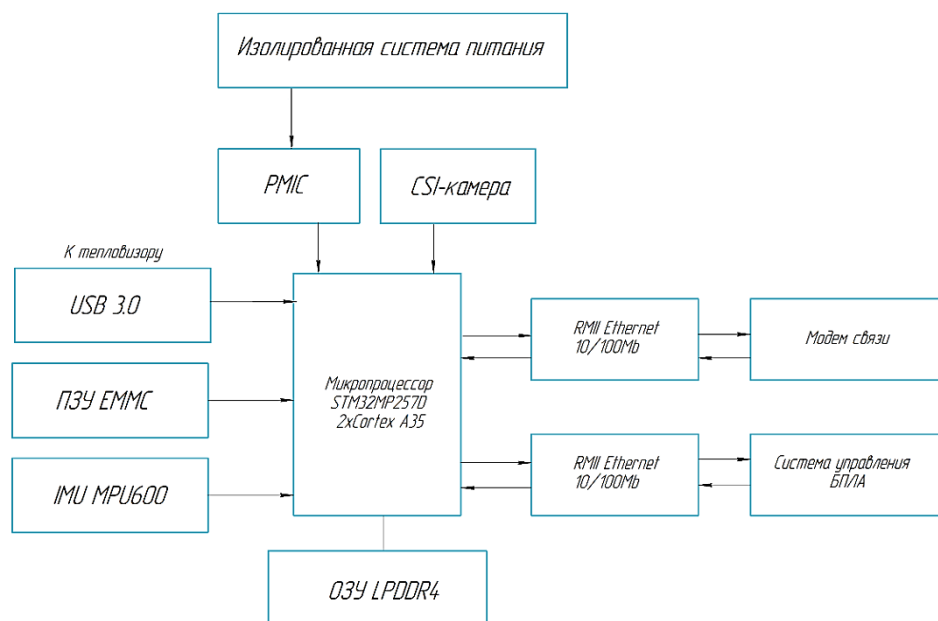


Рис. 4. Структура платы вычислителя

Микропроцессор STM32MP257 обладает следующими характеристиками:

- два ядра Cortex-A35: 64-битные ядра ARMv8-A с частотой 1,5 ГГц, оптимизированные для задач Linux (управление системой и микширование данных);
- ядро Cortex-M33: 32-битное ядро ARMv8-M с частотой до 400 МГц для задач реального времени для управления системой приводов;
- NPU: нейронный процессор с производительностью 1,35 TOPS, предназначенный для ускорения задач машинного обучения, таких как классификация повреждений;
- интерфейсы: поддержка CSI (до 1,5 ГГц), USB 3.0 (5 Гбит/с), Gigabit Ethernet (через RMII), SDMMC для eMMC-памяти;

– *память*: поддержка LPDDR4 (до 3200 МГц) с пропускной способностью до 12,8 ГБ/с;

– *энергопотребление*: типичное потребление в активном режиме — около 1,8 Вт (Cortex-A35) и 0,3 Вт (Cortex-M33), итого около 2,3 Вт при нагрузке (включая NPU);

– *аппаратные ускорители*: поддержка NEON для ускорения вычислений с плавающей точкой на Cortex-A35, а также NPU для задач машинного обучения.

Плата вычислителя должна обеспечивать решение следующих задач:

– *сбор данных*: обработка видеопотока с камеры (разрешение подбирается ниже, 10 кадров/с) через интерфейс CSI, данных с тепловизора (разрешение 640x480, 10 кадров/с) через интерфейс USB 3.0, а также данных с пассивного радарного элемента (до 1 Мбит/с) через USB 3.0;

– *микширование данных*: алгоритм микширования данных с камеры, тепловизора и пассивного радарного элемента для создания единой карты аномалий (таких как корреляция тепловых аномалий с визуальными дефектами и радарными сигналами) [7];

– *обнаружение и классификация поломок*: использование нейронной сети для обнаружения и классификации различных типов поломок ЛЭП, таких как коррозия проводов, повреждение изоляторов, перегрев контактных соединений и обрывы, с частотой не менее 10 кадров в секунду;

– *энергоэффективность*: ограничение энергопотребления (менее 10 Вт) из-за работы на БПЛА с ограниченным энергобюджетом;

– *интерфейсы*: поддержка CSI для камеры, USB 3.0 для тепловизора и пассивного радарного элемента, Ethernet (RMII) для связи с системой управления БПЛА.

Алгоритм работы и программное обеспечение. Предполагается, что система слежения за потенциальным местом поломки ЛЭП должна работать в двух режимах, первый — при работе алгоритма компьютерного зрения, и второй — при работе алгоритма слежения за объектом без участия компьютерного зрения. Второй режим работы должен быть резервным и, в случае потери обследуемого объекта алгоритмом видеораспознавания, система слежения должна переходить в режим работы без камеры и осуществлять поворот модуля с оптическим сенсором в сторону местоположения объекта. После возврата объекта в зону видимости, данная система переходит в основной режим и постоянно отслеживает последнее положение объекта относительно модуля видеораспознавания (рис. 5) [8, 9].

Процесс детектирования и классификации повреждений ЛЭП будет происходить в результате учета показаний сразу с нескольких сенсоров различного типа. Одним из основных является RGB-камера, которая передает

данные в вычислитель модуля, затем происходит анализ целостности опоры и обнаружение посторонних объектов на ЛЭП. При обнаружении каких-либо повреждений или аномалий будет выполнена серия высококачественных фотоснимков для обработки персоналом. Детектирование повреждений ЛЭП будет происходить в том числе с помощью тепловизора для обнаружения тепловых аномалий и пассивного радара, который будет анализировать окружающий спектр на предмет искрения или пожара вне зоны видимости оптических сенсоров [10]. В качестве основной нейронной сети выбирают оптимизированную сеть Yolo8v, а для задач обработки данных и коммуникации с БПЛА применяют операционную систему Linux.

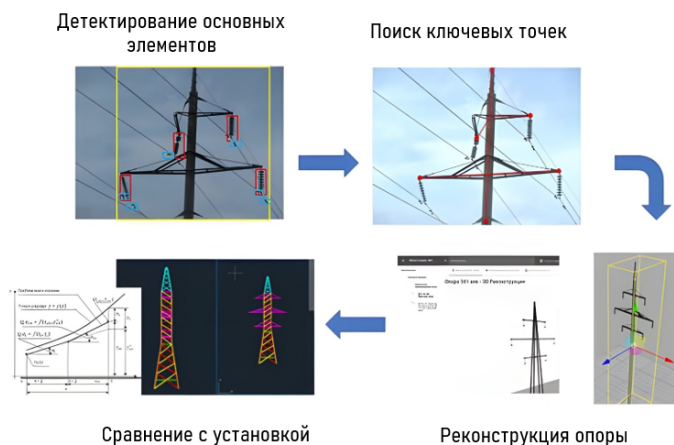


Рис. 5. Алгоритм распознавания опоры ЛЭП

Система управления и стабилизации БПЛА. Для доставки и позиционирования мехатронного модуля предполагается использовать БПЛА самолетного типа. Выбор самолетной схемы обусловлен преимуществами в дальности полета и продолжительности мониторинга по сравнению с мультироторными платформами, что критически важно для обследования протяженных участков ЛЭП.

Система управления БПЛА включает следующие подсистемы (рис. 6):

- *система высокоуровневого управления (автопилот):* обеспечивает навигацию по заранее заданному маршруту (миссии), стабилизацию полета и отработку высоты. Маршрут строится таким образом, чтобы БПЛА пролетал параллельно линии электропередачи на безопасном расстоянии, обеспечивая мехатронному модулю оптимальный угол обзора. В системе планируется наличие канала связи с оператором БПЛА;

– *система стабилизации и ориентации*: включает инерциальную измерительную систему (IMU), GPS/ГЛОНАСС-приемник, барометр и датчик воздушной скорости. Эта система непрерывно вычисляет текущие углы ориентации (крен, тангаж, рыскание) и пространственные координаты БПЛА, подавая корректирующие сигналы на рулевые поверхности (элероны, руль высоты, руль направления) для удержания заданного положения;

– *канал связи с мехатронным модулем*: автопилот БПЛА через высокоскоростной канал связи (например, Ethernet) получает от мехатронного модуля данные о его текущем угле поворота и целеуказания для слежения за опорой ЛЭП. На основе этих данных система управления БПЛА может вносить мелкие коррективы в курс, обеспечивая плавное сопровождение объекта и удержание его в поле зрения сенсоров, компенсируя таким образом собственные колебания платформы.

Данная интегрированная система позволяет активно участвовать в процессе стабилизированного съема данных, повышая качество и точность детектирования повреждений.

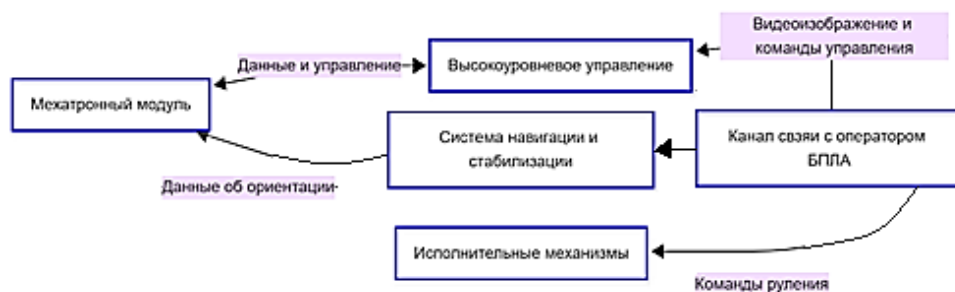


Рис. 6. Структура системы управления БПЛА

Заключение. В результате исследования установлено, что одновременное использование разнотипных сенсоров на БПЛА с последующим микшированием данных в мехатронном модуле представляет собой перспективное направление для научных исследований и практического применения. Это решение не только повышает качество мониторинга ЛЭП, но и открывает возможности для адаптации технологии к другим областям, таким как сельское хозяйство, экология или управление чрезвычайными ситуациями.

Литература

- [1] Воеводина О.Е., Мартко Е.О. Мониторинг состояния линий электропередач: использование беспилотных технологий для обеспечения безопасности и надежности электроснабжения. *Вестник науки*, 2024, т. 3, № 12 (81), с. 1570–1576.
- [2] Иванов Н.О., Куляс Д.И., Шаховцев Я.В. Мониторинг и диагностика воздушных линий электропередачи с применением беспилотных летательных аппаратов. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*, 2023, № 9–1 (84), с. 223–229.
- [3] Бирченко В. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов при эксплуатации электрических сетей. *Электроэнергия. Передача и распределение*, 2021, № 4 (23), с. 46–48.
- [4] Коновалов Ю.В., Вайгачев А.Е. Искусственный интеллект в электроэнергетике. *Современные технологии и научно-технический прогресс*, 2021, № 8, с. 225–226.
- [5] Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2010, № 3 (104), с. 187–196.
- [6] Bu S.-J., Cho S.-B. Time Series Forecasting with Multi-Headed Attention-Based Deep Learning for Residential Energy Consumption. *Energies*, 2020, vol. 13, art. no. 4722.
- [7] Быстров Р.П., Загорин Г.К., Соколов А.В., Федорова Л.В. *Пассивная радиолокация: методы обнаружения объектов*. Москва, Радиотехника, 2008, 320 с.
- [8] Беляев П.В., Головский А.П., Садаев Д.С. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов при контроле и диагностике объектов энергетик. *Динамика систем, механизмов и машин*, 2019, т. 7, № 2, с. 18–24. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-7-2-18-24>
- [9] Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Ч. 3. Экстремальная робототехника. *Российский технологический журнал*, 2020, т. 8, № 3 (35), с. 14–32. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32>
- [10] Дикой В.П., Левандовский А.А., Арбузов Р.С., Овсянников А.Г., Старцев В.В. Мониторинг состояния воздушных линий электропередачи с использованием беспилотного летательного аппарата. *Энергия единой сети*, 2014, № 2 (13), с. 16–25.

Поступила в редакцию 15.10.2025

Новик Даниил Сергеевич — студент магистратуры кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Зеленцов Виктор Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Новик Д.С. Создание мехатронного модуля для автоматического обнаружения повреждений на линиях электропередач. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 03 (104). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/robots/1111.html>

DEVELOPMENT OF A MECHATRONIC MODULE FOR AUTOMATIC DETECTION OF POWER TRANSMISSION LINE FAULTS

D.S. Novik

rezomatrix96@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

This article presents the development of a system for detecting and classifying power transmission line (PTL) faults using multifunctional sensors, including an RGB camera, thermal imager, and passive radar, integrated into a mechatronic module. The article analyzes existing PTL monitoring systems and identifies their limitations. A new approach is proposed, involving the creation of a mechatronic module for automatic fault recognition in PTLs and the use of an unmanned aerial vehicle (UAV) with a high payload capacity equipped with various sensors. The methodology for designing the mechatronic module structure is described. Methods of fault detection are presented, as well as requirements for the control system.

Keywords: power transmission lines, UAV, mechatronic module, multifunctional sensors, thermal imaging, passive radar, computer vision, neural networks, infrastructure diagnostics, fault detection

Received 15.10.2025

Novik D.S. — Master's student, Department of Robotic Systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Zelentsov V.V., Ph. D.(Eng.), Associate Professor, Department of Robotic Systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Novik D.S. Development of a mechatronic module for automatic detection of power transmission line faults. *Politekhnikeskij molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 03 (104). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/menms/robots/1111.html>