

На правах рукописи



Черных Владимир Николаевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
КОНТРОЛЯ ВЕСА ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ
ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону
2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

Научный руководитель	Осипов Владимир Александрович - кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»
Официальные оппоненты	Митрофанов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения», г. Самара Ковалёв Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение транспорта» ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», г. Екатеринбург
Ведущая организация	ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)), г. Москва

Защита состоится **30 ноября 2026 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета 44.2.005.03 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, город Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2., (читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, город Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2 и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 44.2.005.03,
доктор технических наук, профессор



В.А. Финоченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день одним из направлений развития железнодорожного транспорта является повышение надёжности работы устройств тягового электроснабжения. Вместе с этим большое значение имеет совершенствование технологии их технического обслуживания и внедрение средств диагностики, позволяющих получать информацию о состоянии оборудования непосредственно в процессе эксплуатации. Особенно это касается тех устройств, повреждение или неправильная работа которых может привести к нарушению электроснабжения и, как следствие, движения поездов.

Контактная сеть (КС) является одним из основных элементов системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог. Именно посредством контактной сети осуществляется передача электрической энергии к электроподвижному составу (ЭПС), поэтому от её состояния напрямую зависят качество токосъёма и бесперебойность движения поездов. При этом сама контактная сеть имеет значительную протяжённость, располагается на открытой местности, находится под высоким напряжением и не имеет полноценного эксплуатационного резерва. Ввиду этих особенностей практически любое серьёзное повреждение её элементов оказывает влияние не только на работу отдельного устройства, но и на работу участка железной дороги в целом.

На техническое состояние контактной сети постоянно оказывает влияние достаточно большое количество факторов. Помимо нагрузок, возникающих при взаимодействии контактного провода с токоприёмником электроподвижного состава, провода и тросы контактной подвески испытывают токовые и температурные воздействия, находятся под действием ветра и атмосферных осадков. Причём зачастую эти факторы действуют не отдельно друг от друга, а одновременно. Одним из наиболее тяжёлых режимов с этой точки зрения является образование гололёдно-изморозевых отложений на проводах и тросах контактной подвески.

При образовании гололёда в первую очередь изменяется вес проводов и тросов, так как на их поверхности постепенно появляется и увеличивается слой гололёдно-изморозевых отложений. Из-за этого возникает дополнительная вертикальная нагрузка, которая воспринимается не только непосредственно проводами и тросами, но и другими элементами контактной подвески, поддерживающими и опорными конструкциями. При дальнейшем нарастании гололёда условия работы контактной сети ухудшаются ещё больше. Возникает вероятность искрения между ползком токоприёмника и контактным проводом, ухудшается токосъём, а при неблагоприятном развитии процесса возможно повреждение отдельных элементов контактной сети и нарушение движения поездов.

Но для рассматриваемой в работе задачи важно не только то, какие последствия вызывает уже образовавшийся гололёд. Изменение веса проводов и тросов начинается ещё в тот момент, когда внешние признаки

гололёдообразования могут быть практически незаметны. То есть нагрузочное состояние контактной подвески уже начинает изменяться, а определить наличие гололёда визуально или по признакам ухудшения токосъёма ещё затруднительно. Именно поэтому представляет интерес возможность регистрации самого начала изменения нагрузки до того момента, когда гололёдно-изморозевые образования приведут к выраженному ухудшению работы контактной сети.

На участках железных дорог с интенсивным движением поездов одним из дополнительных источников визуального контроля за состоянием контактной сети являются машинист и его помощник. При появлении признаков искрения между ползком токоприёмника и контактным проводом, ухудшении токосъёма или других визуально заметных признаков ненормальной работы КС машинист передаёт информацию дежурному по станции, после чего уже принимается решение о дальнейших действиях. То есть очередной проход электроподвижного состава в данном случае позволяет получить ещё и дополнительную информацию о состоянии контактной сети. Однако нельзя не отметить, что такого рода контроль напрямую зависит от интенсивности движения поездов на контролируемом участке.

Все вышеизложенное указывает на необходимость применения постоянно установленных и действующих в заданных режимах работы технических средств контроля, что позволит осуществлять контроль и наблюдение, не зависящие от прохода ЭПС.

В диссертационной работе в качестве контролируемого параметра предлагается регистрировать изменение усилия в точке крепления неподвижного блока компенсирующего устройства (КУ) к анкерной опоре, поскольку при образовании гололёдно-изморозевых образований вес проводов увеличивается, а соответственно, возрастает и дополнительная вертикальная нагрузка на контактную подвеску. Вся эта дополнительная нагрузка отражается в узлах компенсирующего устройства и приводит к изменению усилий в контролируемой точке, что согласуется с принципом работы КУ - поддержание постоянного натяжения проводов. Именно это изменение и предлагается использовать в дальнейшем как диагностический признак начала гололёдообразования.

Интерпретировать полученное датчиком значение силы необходимо с учётом типа КУ, поскольку они различаются как конструктивно, так и по передаче усилий от КС до точки контроля. Именно эти особенности потребовали разработки силовых математических моделей для трёх наиболее распространенных систем блочной компенсации натяжения, которые позволяют установить связь между дополнительной нагрузкой и приращением усилия в точке контроля.

Актуальность темы диссертационной работы определяется необходимостью повышения эффективности раннего обнаружения гололёдообразования, особенно на малодеятельных участках контактной сети, путём применения автоматизированной системы контроля веса проводов, принцип действия которой основан на тензометрическом контроле.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в области расчёта, диагностирования и повышения работоспособности контактной сети внесли отечественные и зарубежные учёные: И. А. Беляев, А. С. Брюханов, В. Я. Берент, А. Т. Бурков, И. И. Власов, В. А. Вологин, А. Г. Галкин, А. С. Голубков, Ю. И. Горошков, А. Т. Демченко, Ю. И. Жарков, А. В. Ефимов, А. А. Ковалёв, А. А. Кудрявцев, Е. В. Кудряшов, В. Н. Ли, К. Г. Марквардт, Г. П. Маслов, Н. В. Миронос, А. Н. Митрофанов, В. П. Михеев, В. М. Павлов, А. В. Паранин, А. В. Плакс, А. М. Сафарбаков, О. А. Сидоров, Ю. Г. Семёнов, А. Н. Смердин, П. Г. Тюрнин, А. В. Фрайфельд, Y. Chen, B. Fink, F. Kiessling, A. Schmieder, H. Tessun, T. Usuda, G. Wang и другие исследователи.

Исследованиями в области контактных сетей и их механического расчёта также занимался ряд отечественных и зарубежных ученых: К. Г. Марквардт, В. Н. Пупынин, Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Ю. Г. Семёнов, О. В. Кубкина, М. А. Трубицин, О. Г. Лукашевич, Т. Е. Петрова, В. Е. Марский, Н. В. Миронос, А. В. Ковалёв, А. Г. Галкин, А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко и другие авторы.

Существующие на сегодняшний день системы, методы и подходы к диагностированию системы тягового электроснабжения не обеспечивают должного уровня снижения наработок на отказ системы электроснабжения, а с ростом грузо-пассажирооборота количество этих отказов лишь возрастает. Основная доля прекращения движения поездов на малодеятельных участках железной дороги выпадает на осенне-зимний и зимне-весенний периоды. Именно в эти периоды риск образования гололёдно-изморозевых образований на проводах и устройствах контактной сети максимален из-за резко меняющихся погодных условий и перепадов температур окружающей среды.

Ситуация осложняется для малодеятельных участков, поскольку они лишены возможности визуального контроля состояния гололёдообразования со стороны машиниста поезда, в отличие от участков с высокой интенсивностью движения поездов. Согласно инструкции при обнаружении признаков искрения полоза токоприемника машинист электропоезда сообщает по рации дежурному по станции следования о наблюдаемом эффекте, который в свою очередь передает полученную информацию энергодиспетчеру участка, который принимает решение о мерах борьбы с гололёдом. Благодаря таким действиям персонала минимизируется возможность образования гололёдной муфты, способной привести к наихудшим последствиям.

Для обеспечения высоких показателей качества токосъема и надёжности работы системы электроснабжения необходимо организовывать контроль за состоянием контактной сети в режиме «онлайн». Улучшение эксплуатационных характеристик систем электроснабжения тяговой сети за счёт применения постоянно присутствующей автоматизированной системы контроля веса проводов (АСКВП) контактной подвески позволит холдингу ОАО «РЖД» снизить экономические затраты, направленные на восстановление поврежденных участков контактной сети вследствие образования на их проводах и поддерживающих конструкциях льда.

Таким образом, создание и внедрение систем раннего обнаружения гололёдно-изморозевых образований на проводах и тросах контактной сети

электрифицированных железных дорог позволит дистанционно оценивать ситуацию гололёдообразования, что позволит персоналу энергоучастка оценить ситуацию в режиме реального времени и применить необходимые меры в зависимости от полученных данных.

Объект исследования – устройства контактной сети электрифицированных железных дорог.

Область исследования – системы компенсации натяжения проводов и тросов контактной подвески и тензометрический контроль изменения её нагрузочного состояния.

Цель диссертационной работы - повышение эффективности раннего обнаружения признаков гололёдообразования на малодеятельных участках контактной сети. Решение этой задачи предлагается за счёт разработки математических моделей, измерительного комплекса и методики применения автоматизированной системы контроля веса проводов.

Для достижения поставленной цели сформулированы **следующие задачи:**

- анализ существующих методов обнаружения гололёдно-изморозевых образований на контактной сети и обоснование применимости тензометрического контроля для оценки изменения нагрузочного состояния проводов и тросов;
- разработка способа тензометрического контроля изменения веса проводов и обоснование точки размещения измерительного узла в компенсирующем устройстве;
- разработка математических моделей компенсирующих устройств, устанавливающих связь между дополнительной вертикальной нагрузкой и изменением усилия в точке контроля;
- разработка структуры и алгоритмов работы АСКВП, обеспечивающих регистрацию, обработку и интерпретацию тензометрических измерений;
- разработка методики применения АСКВП на малодеятельных участках и экспериментальная проверка информативности выбранной точки контроля на функциональном макете.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- предложен способ тензометрического контроля изменения веса проводов и тросов, отличающийся размещением измерительного узла в выбранной точке компенсирующего устройства; в качестве информативного признака используется приращение усилия относительно исходного значения;
- разработаны математические модели трёх типов систем компенсации натяжения - блочно-полиспастной, двухблочной и трёхблочной, - устанавливающие количественную связь между ΔG и ΔS и позволяющие выполнять расчётную оценку нагрузки с учётом типа компенсирующего устройства.

Теоретическая значимость заключается в развитии расчётных представлений о передаче вертикальной нагрузки от проводов к элементам компенсирующих устройств. Модели трёх типов систем дают возможность решать прямую и обратную задачи с учётом конструктивных особенностей конкретного устройства.

Практическая значимость результатов диссертационной работы:

- определены структура и состав измерительного комплекса АСКВП с размещением узла в зоне компенсирующего устройства;
- разработаны алгоритмы обработки показаний, калибровки и контроля достоверности, обеспечивающие формирование S_0 и выделение ΔS ;
- предложен принцип работы расчётного ядра для оценки ΔG по результатам измерений;
- разработана методика применения АСКВП на малодеятельных участках, включающая все этапы - от выбора участка до информирования персонала;
- на функциональном макете подтверждена возможность регистрации изменения усилия и выделения ΔS .

Полученные результаты создают основу для перехода к опытному образцу АСКВП и его испытаниям на действующем участке.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования базировались на положениях теории расчёта контактной сети, теоретической механики и математического моделирования. Для определения связи между нагрузкой и усилием использовались уравнения равновесия элементов компенсирующих устройств. Экспериментальная часть выполнена с применением тензометрических измерений на функциональном макете; работоспособность способа проверялась тарировкой канала и ступенчатым нагружением.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью применяемых теоретических положений, соответствием зависимостей физическим процессам, согласованностью прямой и обратной задач, а также экспериментальным подтверждением на макете.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» по пунктам:

к п. 1 «Эксплуатационные характеристики и параметры подвижного состава и систем тягового электроснабжения, повышение их эксплуатационной надёжности и работоспособности. Системы электроснабжения железных дорог, промышленного железнодорожного транспорта, рельсового городского транспорта и метрополитенов. Методы и средства снижения энергетических потерь, обеспечения энергетической безопасности тяги поездов и электроснабжения железных дорог»;

к п. 4 «Совершенствование подвижного состава, включая тяговый привод и энергетические установки автономных локомотивов; тяговых и трансформаторных подстанций, тяговых сетей, включая накопители энергии, преобразователи, аппараты, устройства защиты системы тягового электроснабжения. Улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава и устройств электроснабжения, канализация обратного тягового тока».

Основные положения, выносимые на защиту:

Способ тензометрического контроля изменения веса проводов, основанный на регистрации приращения усилия в выбранной точке компенсирующего устройства.

Математические модели блочно-полиспастной, двухблочной и трёхблочной систем компенсации, устанавливающие связь между ΔG и ΔS .

Структура и алгоритмы АСКВП, обеспечивающие регистрацию, обработку, калибровку, выделение ΔS и оценку ΔG .

Методика применения АСКВП для обнаружения гололёдообразования на малодоельных участках и поддержки решений персонала.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в очном и дистанционном форматах:

- на Международной научно-технической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2020);

- на Международной научно-технической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2021);

- на Международной научной конференции «Механика и трибология транспортных систем (МЕХТРИБОТРАНС-2021)» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2021);

- на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2023);

- на Международной научно-технической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2023);

- на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2024);

- на Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2024);

- на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России (ТрансПромЭк-2024)» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2024);

- на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2025);

- на IX Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2025);

- на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2026);

- на заседаниях кафедры «Теоретические основы электротехники» ФГБОУ ВО РГУПС.

Кроме того, тематика диссертационного исследования получила поддержку в рамках программы «УМНИК-2025» по проекту «Разработка автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети для своевременного оповещения персонала о начале гололёдообразования», договор № 19839ГУ/2025 от 05.12.2025.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 13 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 8 работ в сборниках международных научных конференций и 1 патент Российской Федерации на изобретение № 2823373 С1 «Автоматизированная система контроля веса проводов контактной сети железной дороги».

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объём работы составляет 158 страниц, в том числе 123 страницы основного текста. Работа содержит 39 рисунков, 15 таблиц и список литературы, включающий 106 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены объект и область исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы.

В первой главе проведён анализ существующих способов обнаружения гололёдно-изморозевых образований на контактной сети и воздушных линиях, обоснована необходимость контроля изменения нагрузочного состояния проводов и тросов.

Контактная сеть - один из самых ответственных элементов системы тягового электроснабжения. От её технического состояния зависят качество токосъёма, устойчивость движения поездов и надёжность работы участка. В работе провода, тросы и поддерживающие элементы находятся под воздействием температуры, ветра, осадков, изморози, гололёда и мокрого снега. При гололёде растёт нагрузка, меняется состояние подвески, ухудшается контакт с токоприёмником, появляется искрение.

Рассмотрены основные факторы, определяющие нагрузки на провода. Температура и ветер создают условия для неблагоприятного режима, но главное механическое последствие гололёда - увеличение веса проводов. Дополнительная нагрузка может распределяться по анкерному участку неравномерно. По одним только расчётным или метеорологическим данным оценить реальное состояние трудно. Особенно это касается малодеятельных участков, где провод долго не взаимодействует с токоприёмником. Там отложения могут появляться без внешнего наблюдения, и начальная стадия изменения нагрузки остаётся незамеченной.

Выполнен анализ методов обнаружения гололёда: визуальных, метеорологических, термодинамических, электрических, ёмкостных, оптических, локационных, инклинометрических и механических. Визуальный контроль - самый простой, но требует наблюдателя или прохода поезда. Такие признаки, как искрение и дуговые процессы, говорят уже о развившемся режиме, для раннего обнаружения они не годятся.

Метеорологические и термодинамические методы помогают определить условия для гололёда, но не дают информации о фактическом механическом

состоянии конкретной подвески. Электрические, оптические и другие методы обеспечивают инструментальный контроль отдельных признаков, но их применение на контактной сети ограничено конструкцией подвески, высоким напряжением, взаимодействием провода с токоприёмником и влиянием компенсирующих устройств на передачу усилий.

Отдельно рассмотрены средства диагностики для контроля геометрических параметров, качества токосъёма, натяжения проводов, перемещения элементов компенсаторов и других показателей. Периодические средства дают достоверную информацию на момент контроля, но не обеспечивают непрерывного наблюдения. Для раннего обнаружения гололёда на малодеятельных участках их возможностей не хватает.

Один из признаков изменения состояния - перемещение грузов компенсирующего устройства (рисунок 1). Но он косвенный и зависит не только от нагрузки, но и от температуры, трения в блоках, состояния канатов, массы грузов и конструкции компенсатора. Поэтому более информативно контролировать усилие в выбранной точке механической системы.

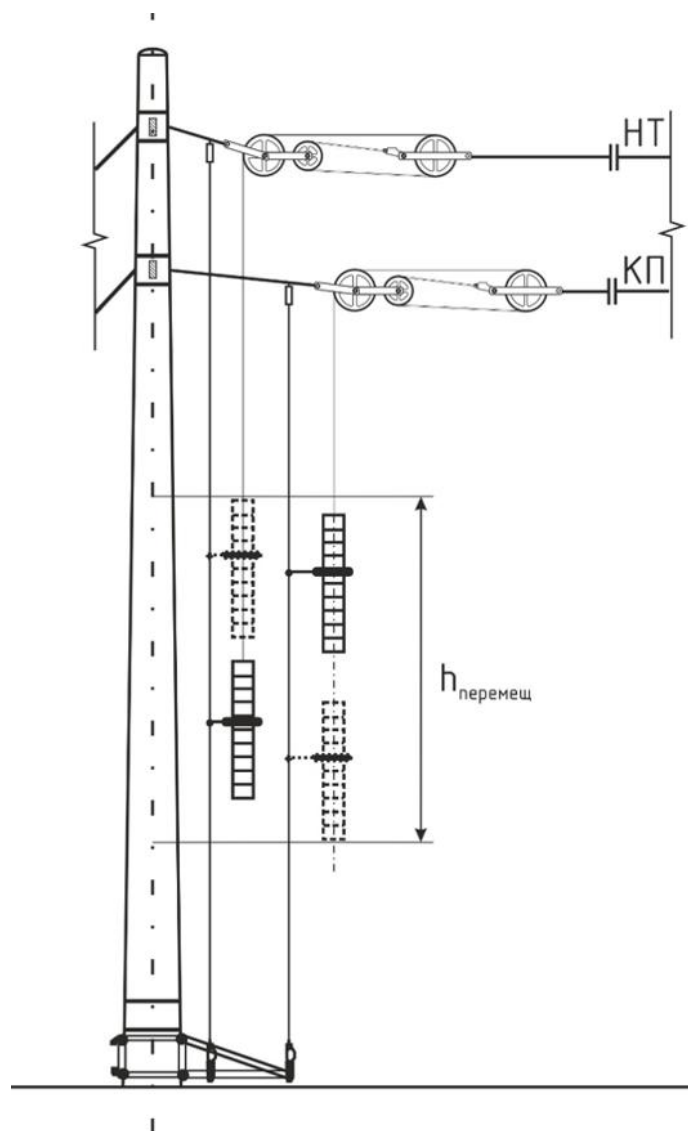


Рисунок 1 – Изменение высоты грузов компенсации от внешнего воздействия

Механические методы ближе всего к задаче раннего обнаружения, потому что фиксируют не внешние признаки или метеоусловия, а само последствие - появление дополнительной нагрузки. В системах мониторинга воздушных линий уже есть решения на тензодатчиках.

Прямое перенесение таких решений на контактную сеть затруднено - контактный провод взаимодействует с токоприёмником, находится под высоким напряжением, есть ограничения по установке дополнительного оборудования. Но наличие компенсирующего устройства позволяет по-другому подойти к задаче. Измерительный узел можно разместить не на рабочей части провода, а в зоне компенсирующего устройства, где дополнительная нагрузка проявляется через изменение усилий в элементах механической системы.

Результаты первой главы показали: для малодеятельных участков наиболее перспективен постоянно действующий контроль изменения нагрузочного состояния проводов. Тензометрическая регистрация приращения усилия в выбранной точке компенсирующего устройства даёт диагностический признак, связанный с увеличением веса проводов при гололёде - без установки оборудования на рабочую часть контактного провода.

Это определяет необходимость разработки диагностических моделей, которые связывают нагрузку от отложений с откликом тензодатчика. Этому посвящена вторая глава.

Во второй главе «Разработка математических моделей тензометрического контроля веса проводов контактной подвески» разработан метод тензометрического контроля, основанный на регистрации приращения усилия в выбранной точке компенсирующего устройства с последующей расчётной интерпретацией сигнала.

В первой главе было показано: на малодеятельных участках раннее обнаружение гололёда лучше делать не по внешним признакам, а по изменению нагрузочного состояния подвески. Во второй главе эта идея получила развитие - дополнительную нагрузку от гололёда ΔG связали с приращением усилия ΔS в точке контроля. В общем виде зависимость выглядит так:

$$\Delta S = F(\Delta G) \quad (1)$$

где ΔG - нагрузка от гололёда; ΔS - приращение усилия; F - функция, которая зависит от типа компенсирующего устройства, схемы передачи усилий и места установки датчика.

Суть метода в том, что при гололёде масса проводов растёт, появляется дополнительная вертикальная нагрузка, которая передаётся в систему компенсации. В компенсированной подвеске это не означает простого увеличения натяжения - компенсатор держит его в пределах нормы. Но нагрузка перераспределяет усилия в узлах системы, и изменение силы S в выбранной точке можно использовать как диагностический признак. Принцип показан на рисунке 2.

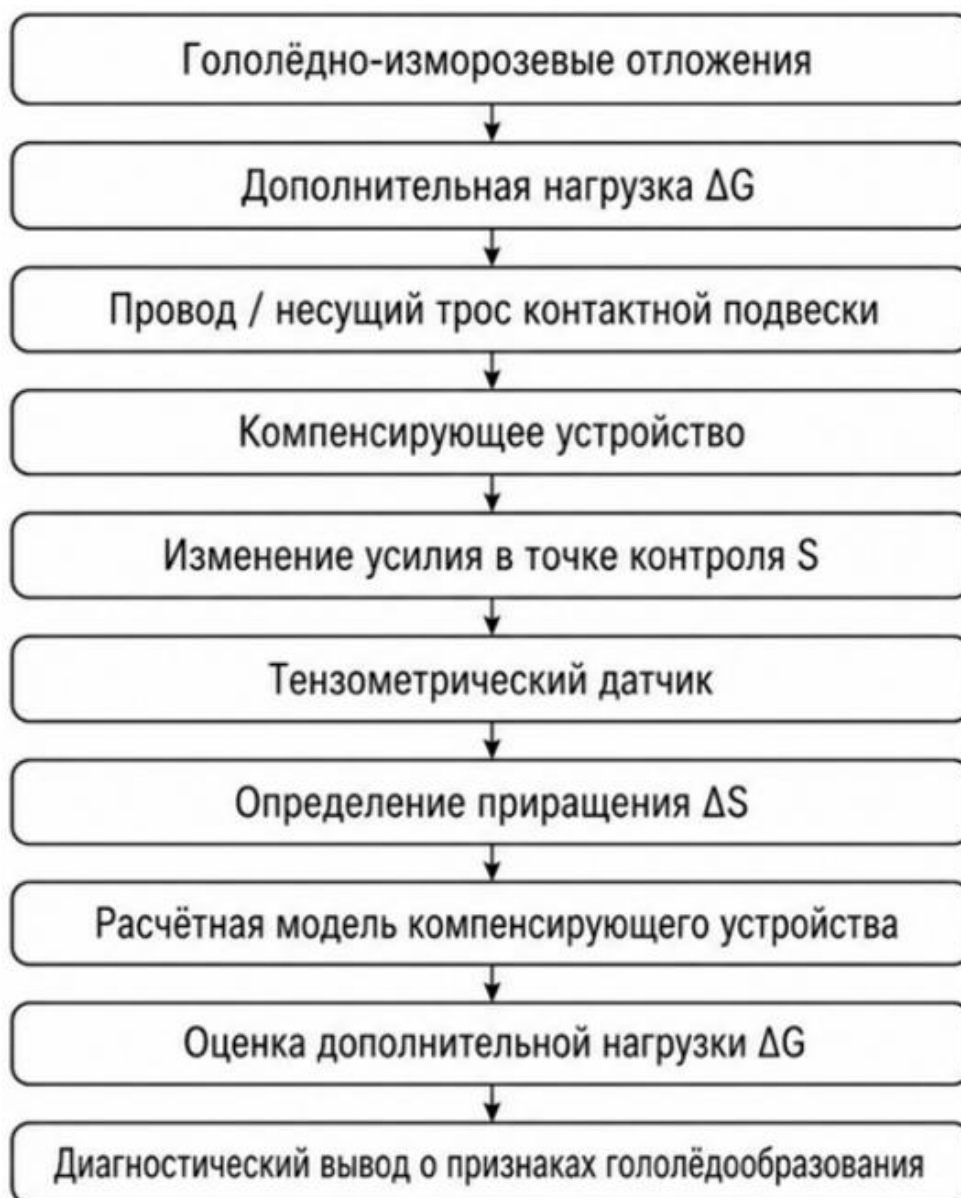


Рисунок 2 – Принцип тензометрического контроля изменения веса проводов и тросов контактной подвески

Для полностью компенсированной подвески логичнее всего перенести измерительный узел в зону компенсирующего устройства. Так датчик не мешает токосъёму и не стоит на рабочей части провода, а изменение усилия от гололёда всё равно регистрируется. Схема размещения датчика - на рисунке 3.

После выбора точки контроля уточнили расчётные модели для трёх типов компенсирующих устройств, которые используются на контактной сети: блочно-полиспастной, двухблочной и трёхблочной. Для каждой записали уравнения равновесия блоков и условия передачи усилий через канатные ветви. На их основе получили зависимости, связывающие усилие S в точке контроля с дополнительной нагрузкой ΔG .

Для блочно-полиспастной системы результирующее усилие складывается из горизонтальной составляющей (натяжение подвески) и вертикальной (вес грузов и нагрузка от проводов). При гололёде вертикальная составляющая получает приращение, и измеряемое усилие меняется.

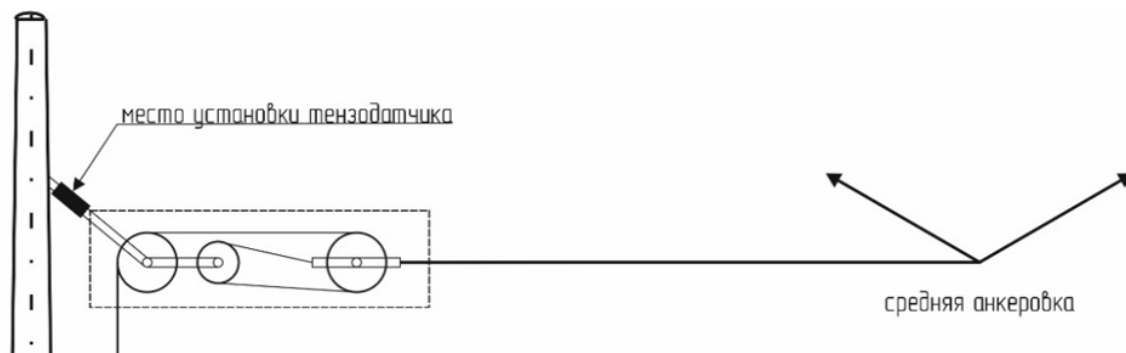


Рисунок 3 – Схема размещения тензометрического датчика в системе полной компенсации натяжения

Получены зависимости для текущего усилия, приращения ΔS и обратной оценки нагрузки:

$$S = \sqrt{Q^2 + (P + G + \Delta G)^2} \quad (2)$$

$$\Delta S = \sqrt{Q^2 + (P + G + \Delta G)^2} - \sqrt{Q^2 + (P + G)^2} \quad (3)$$

$$\Delta G = \sqrt{(S_0 + \Delta S)^2 - Q^2} - (P + G) \quad (4)$$

Для двухблочной системы расчётная зависимость выводится из уравнений равновесия двух блоков. Здесь, в отличие от первой схемы, нужно учитывать не только S , но и дополнительный силовой параметр Q - он характеризует выходную ветвь системы. Выражения для текущего усилия, базового значения, приращения и обратной оценки:

$$S = \sqrt{2P^2 + P(G + \Delta G)} \quad (5)$$

$$S_0 = \sqrt{2P^2 + PG} \quad (6)$$

$$\Delta S = \sqrt{2P^2 + P(G + \Delta G)} - \sqrt{2P^2 + PG} \quad (7)$$

$$\Delta G = \frac{\Delta S^2}{P} + 2\Delta S \sqrt{2 + \frac{G}{P}} \quad (8)$$

Для трёхблочной системы модель сложнее - нагрузка передаётся через несколько блоков и промежуточных ветвей, усилия перераспределяются внутри компенсатора, и отклик в точке контроля получается менее выраженным. Получены условие реализуемости, выражение для текущего усилия, базового значения, ΔS и обратной оценки ΔG :

$$S = \sqrt{2P^2 + \frac{P}{2}(G + \Delta G)} \quad (9)$$

$$S_0 = \sqrt{2P^2 + \frac{PG}{2}} \quad (10)$$

$$\Delta S = \sqrt{2P^2 + \frac{P}{2}(G + \Delta G)} - \sqrt{2P^2 + \frac{PG}{2}} \quad (11)$$

$$\Delta G = \frac{2\Delta S^2}{P} + 4\Delta S \sqrt{2 + \frac{G}{2P}} \quad (12)$$

Эти выражения решают две задачи. Прямая: по известной ΔG определить ожидаемое S и ΔS . Обратная: по измеренному ΔS рассчитать добавочную нагрузку. Обратная задача - основная для диагностики, потому что на практике измеряется не масса гололёда, а изменение усилия в узле.

Для удобства полученные зависимости свели в практическую форму. Она не заменяет полный вывод, а служит рабочей основой для расчётного ядра системы. В программе выбор формулы делается по типу компенсирующего устройства из паспорта узла.

Из таблицы 1 видно: все три типа устройств работают по общей логике - ΔG меняет S , а измеренное ΔS позволяет оценить ΔG . Но вид зависимости для каждой схемы свой. Для блочно-полиспастной связь самая прямая. Для двухблочной нужно учитывать условие применимости схемы и параметр Q . Для трёхблочной отклик слабее - требуется более чувствительный датчик, стабильный S_0 и хорошая фильтрация сигнала.

Таблица 1 – Сводная форма практических зависимостей для расчёта усилия и оценки дополнительной нагрузки

Схема компенсации	Прямая зависимость для S	Обратная оценка ΔG
Блочно-полиспастная	$S = \sqrt{Q^2 + (P + G + \Delta G)^2}$	$\Delta G = \sqrt{(S_0 + \Delta S)^2 - Q^2} - (P + G)$
Двухблочная	$S = \sqrt{2P^2 + P(G + \Delta G)}$	$\Delta G = \frac{\Delta S^2}{P} + 2\Delta S \sqrt{2 + \frac{G}{P}}$
Трёхблочная	$S = \sqrt{2P^2 + \frac{P}{2}(G + \Delta G)}$	$\Delta G = \frac{2\Delta S^2}{P} + 4\Delta S \sqrt{2 + \frac{G}{2P}}$

По зависимостям построили номограмму - она позволяет оценить, как изменятся показания датчика при увеличении массы гололёда для разных марок проводов. С ростом массы ΔS устойчиво растёт — это подтверждает возможность использования тензометрического признака для автоматизированного контроля. Пример для блочно-полиспастной системы – на рисунке 4.

Сравнительная оценка показала: все три типа компенсирующих устройств пригодны для тензометрического контроля, но отличаются величиной отклика и сложностью интерпретации. Проще всего с блочно-полиспастной системой. Двухблочная требует учёта дополнительного параметра Q . Трёхблочная - более высоких требований к измерениям, калибровке и обработке.

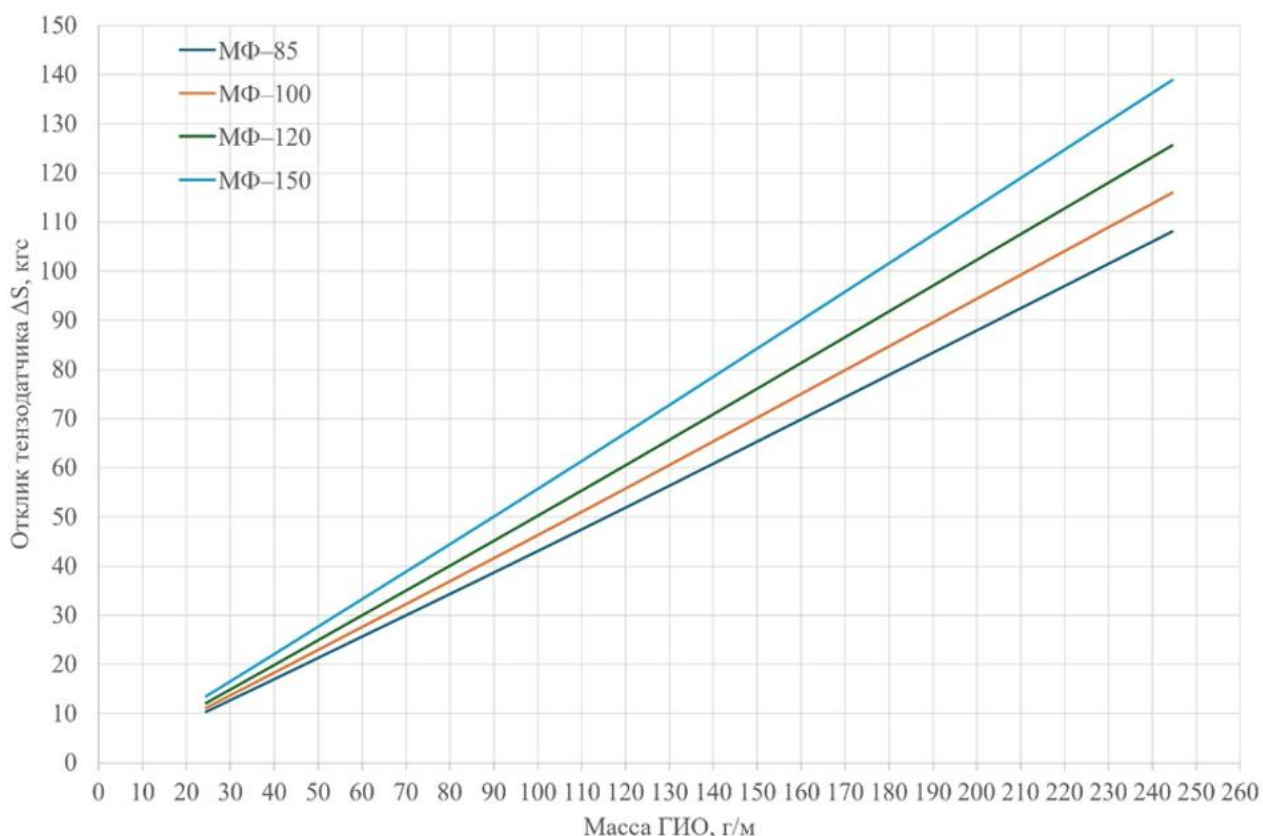


Рисунок 4 – Номограмма расчётного изменения показаний тензометрического датчика при увеличении массы гололёдных отложений для блочно-полиспастной системы компенсации натяжения

Результаты второй главы - математическая основа АСКВП. Разработанные зависимости позволяют перейти от физического факта (увеличение веса проводов при гололёде) к измеряемому приращению усилия в точке контроля и обеспечивают расчётную базу для построения ядра системы и её практической реализации.

В третьей главе «Разработка структуры и алгоритмов автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети» предложена структура АСКВП как измерительно-расчётного комплекса. Он предназначен для регистрации изменения усилия в выбранной точке компенсирующего устройства, первичной обработки показаний тензодатчика и расчётной оценки дополнительной нагрузки на провода и тросы.

Зависимости между ΔG и ΔS из второй главы стали расчётной основой. В систему вошли измерительный узел, блок первичного преобразования сигнала, источник питания, модуль передачи данных, программа обработки и расчётное ядро. Система заточена под малоделятельные участки, где по сообщениям локомотивных бригад гололёд вовремя не выявить. Общая структурная схема - на рисунке 5.

В измерительном канале усилие S передаётся на тензодатчик, преобразуется в электрический сигнал, усиливается, оцифровывается и поступает в программу. Там проверяется корректность данных, текущее значение сравнивается с базовым S_0 и вычисляется приращение.

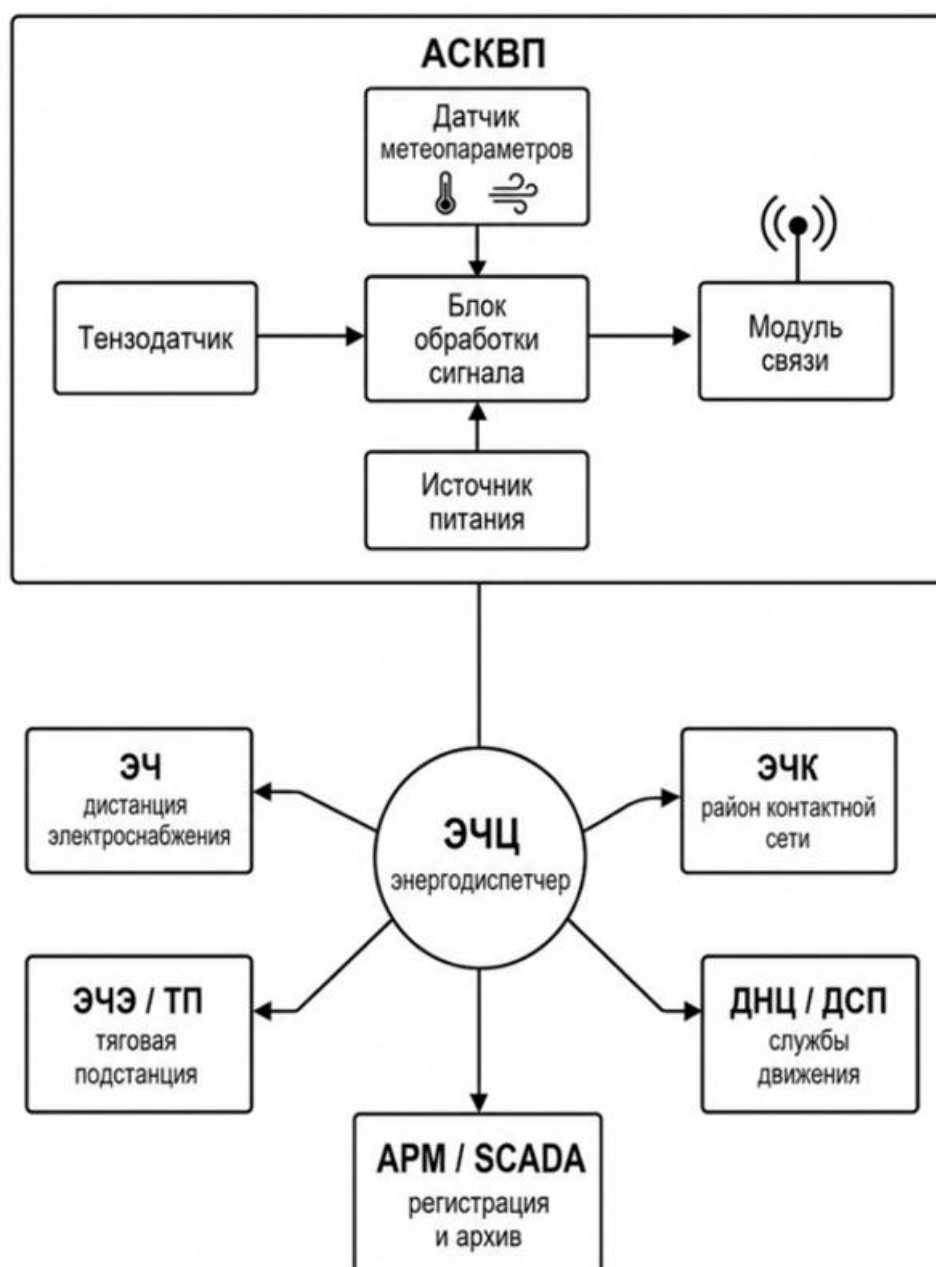


Рисунок 5 – Общая структурная схема АСКВП и её взаимодействия с эксплуатационными подразделениями

Разработан алгоритм регистрации и первичной обработки: приём цифрового отсчёта, проверка технической допустимости, пересчёт в S , фильтрация кратковременных возмущений, сравнение с S_0 , оценка устойчивости отклонения. Последовательность обработки - на рисунке 6.

При обработке важно отличать случайный выброс от устойчивого изменения. Гололёд – это не одиночный всплеск, а сохраняющееся или нарастающее изменение нагрузки. Поэтому если сигнал прыгнул и вернулся - в расчётное ядро это не должно передаваться как признак гололёда.

Отдельно разобрали калибровку и задание S_0 . Базовый уровень надо определять не расчётно, а по результатам измерений на конкретном устройстве - с учётом места установки датчика, состояния блоков и канатов, трения, монтажа

и параметров канала. Чтобы не было ошибок, предложили вести паспорт узла: тип компенсатора, S_0 , параметры канала, место установки, регламентные работы.

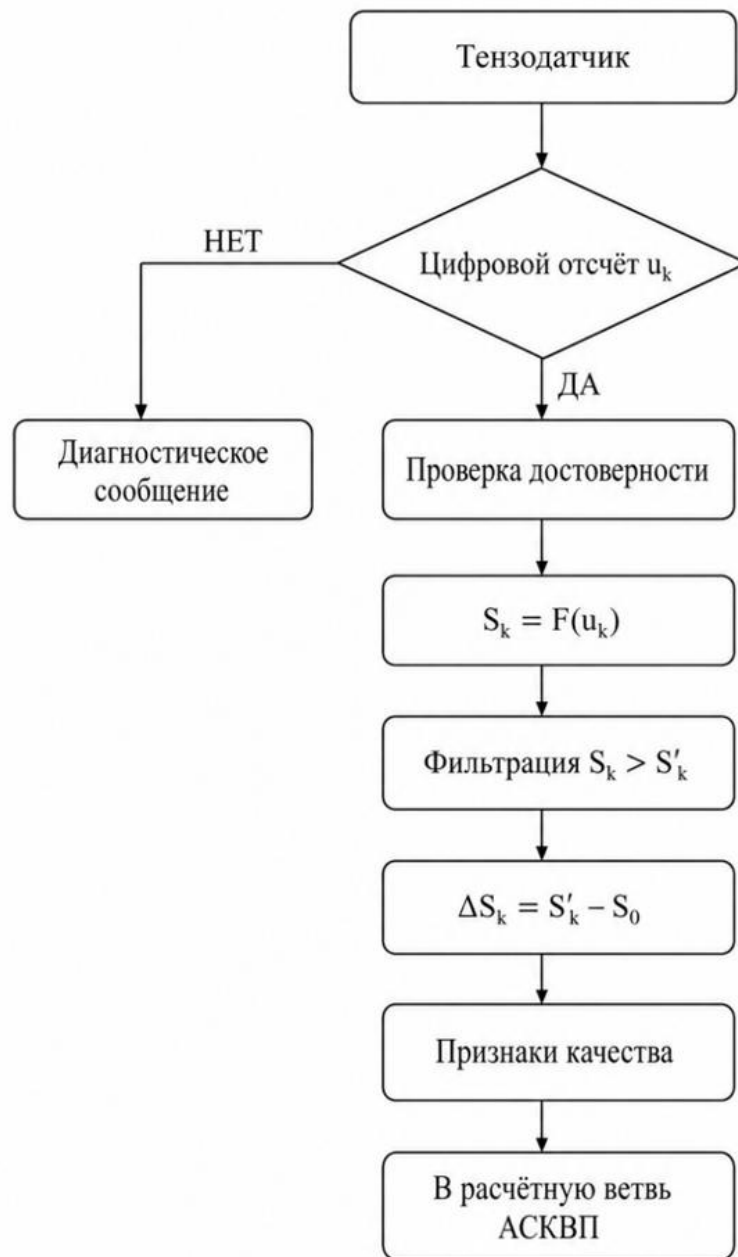


Рисунок 6 – Алгоритм регистрации и первичной обработки показаний тензометрического датчика АСКВП

Центральный элемент - расчётное ядро АСКВП. Его задача - взять проверенное ΔS и получить оценку ΔG . На вход подаются текущее S , S_0 , ΔS , тип компенсирующего устройства и параметры модели. Принцип работы показан на рисунке 7.

Ядро выбирает нужную расчётную ветвь по типу компенсатора. Для каждой из трёх систем - свои зависимости из второй главы.

Полученное ΔG сопоставляется с параметрами участка: длина анкерного участка, марка провода, эквивалентный диаметр, прирост массы Δm , пороговые

уровни. Так от силового признака переходят к эксплуатационной оценке изменения нагрузки.

Результаты третьей главы позволяют рассматривать АСКВП не просто как датчик, а как измерительно-расчётную систему. Разработанные решения обеспечивают последовательный переход от изменения состояния подвески к ΔS , его проверке, расчёту ΔG и выдаче диагностической информации персоналу.

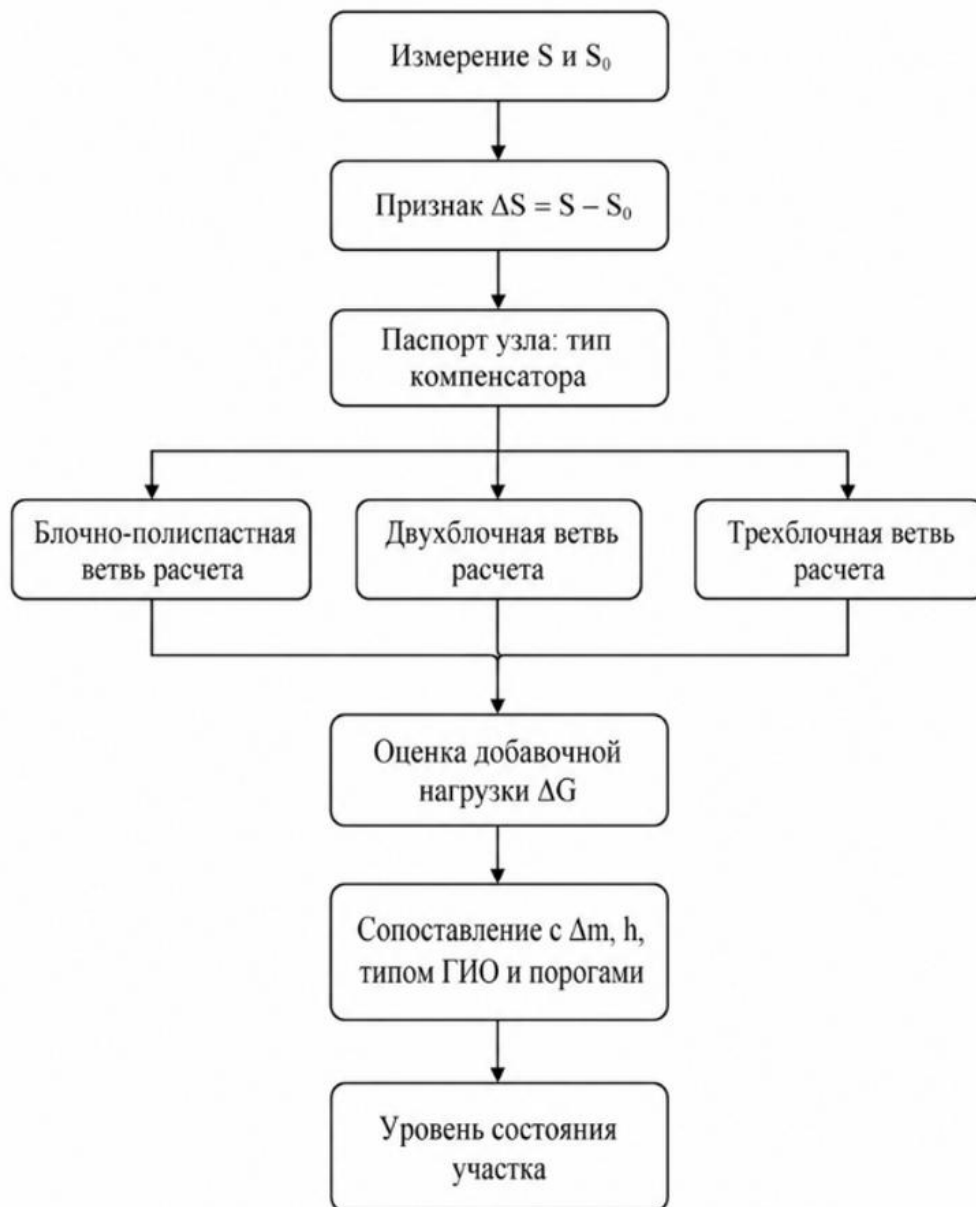


Рисунок 7 – Принцип работы расчётного ядра АСКВП

В четвертой главе «Предлагаемая методика применения автоматизированной системы контроля веса проводов для обнаружения гололёдообразования на малодеятельных участках контактной сети» применение АСКВП, как показано в работе, наиболее оправдано на малодеятельных участках электрифицированных железных дорог. Следует отметить, что именно там увеличенные интервалы между проходами поездов не позволяют организовать регулярный визуальный контроль за состоянием контактной сети. В подобных

условиях тензометрический контроль в зоне компенсирующего устройства вполне может служить дополнительным источником информации - чтобы зафиксировать момент, когда нагрузка на провода и тросы подвески начала меняться.

Методика применения АСКВП включает в себя несколько этапов: выбор участка, паспортизацию точки контроля, установку и калибровку измерительного узла, задание базового уровня S_0 , регистрацию усилия S , выделение устойчивого приращения ΔS , расчётную интерпретацию и передачу сообщения персоналу. При этом расчёт ΔG рассматривается не как прямое измерение массы отложений, а, скорее, как количественное пояснение к тому, что изменился сигнал. Иными словами, это не замена прямым измерениям, а дополнительная аналитическая информация.

Для того чтобы проверить, работает ли предложенный принцип, был собран функциональный макет измерительного узла тензометрического контроля. Его задача - оценить, можно ли зарегистрировать изменение усилия в выбранной точке, если нагрузку на моделируемый провод увеличивать. Схема функционального макета показана на рисунке 8.

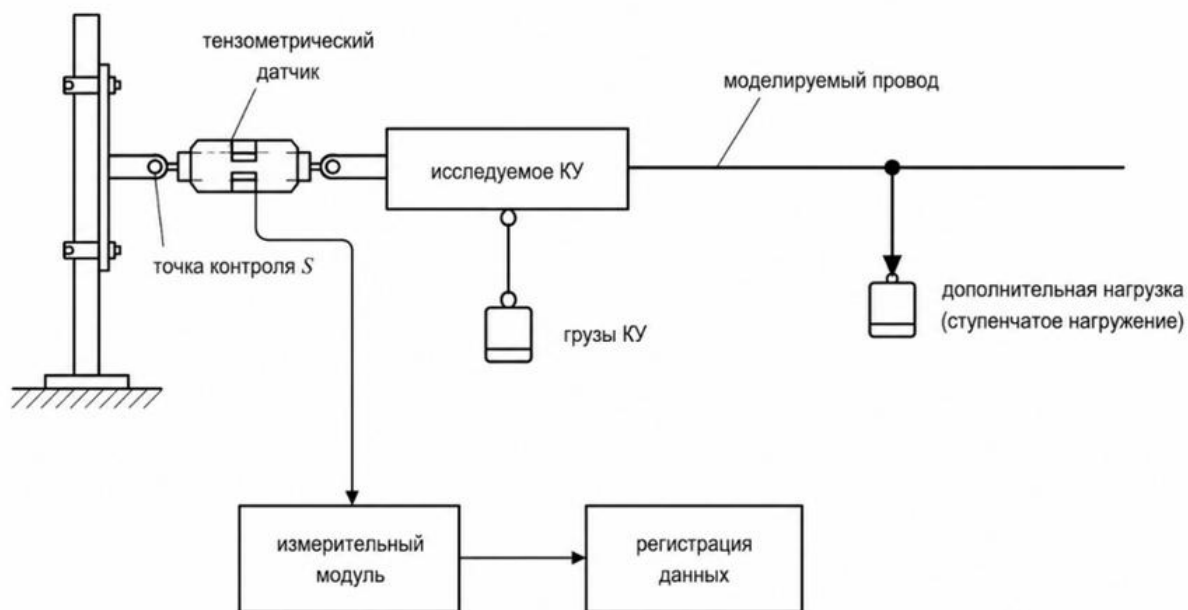


Рисунок 8 - Схема функционального макета измерительного узла тензометрического контроля

Схема, по своему содержанию, отражает идею эксперимента: дополнительная нагрузка прикладывается к проводу, изменение нагрузочного состояния передаётся через компенсирующее устройство, а тензодатчик фиксирует изменение усилия S в выбранной точке. Для проверки этого принципа схема была реализована в виде действующего макета. Его внешний вид показан на рисунке 9.

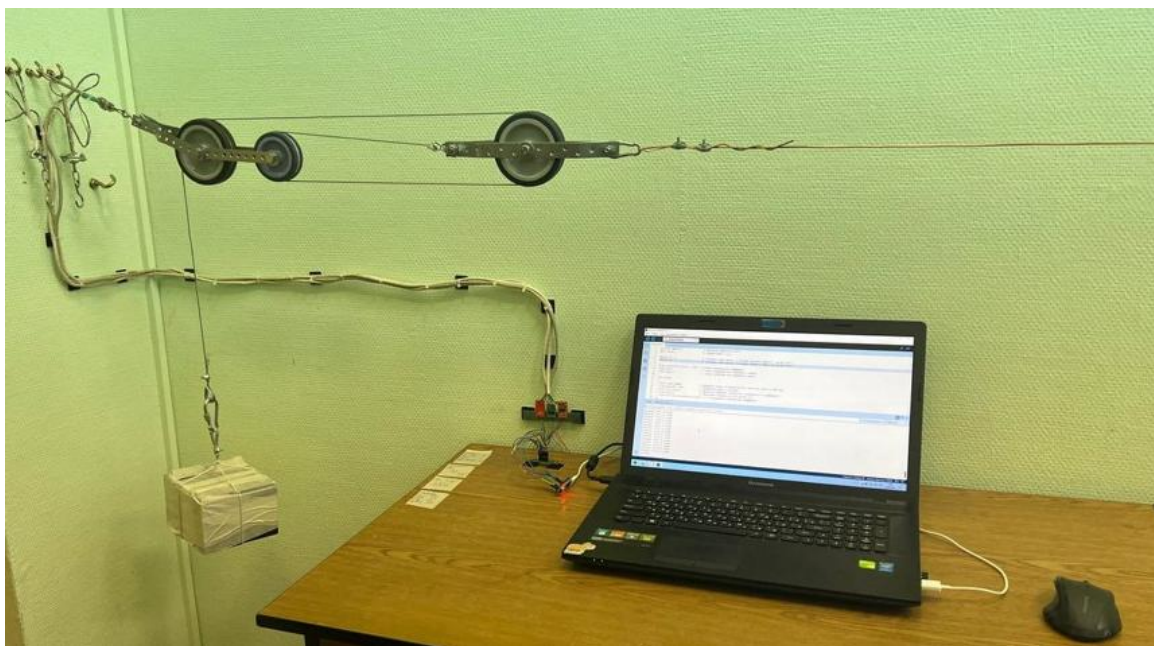


Рисунок 9 - Внешний вид реализованного функционального макета измерительного узла

Информативность выбранной точки оценивалась в режиме ступенчатого нагружения. Установлено, что при увеличении нагрузки показания датчика переходят на более высокий уровень, а после её снятия возвращаются к значениям, близким к исходным. График, иллюстрирующий это поведение, приведён на рисунке 10.

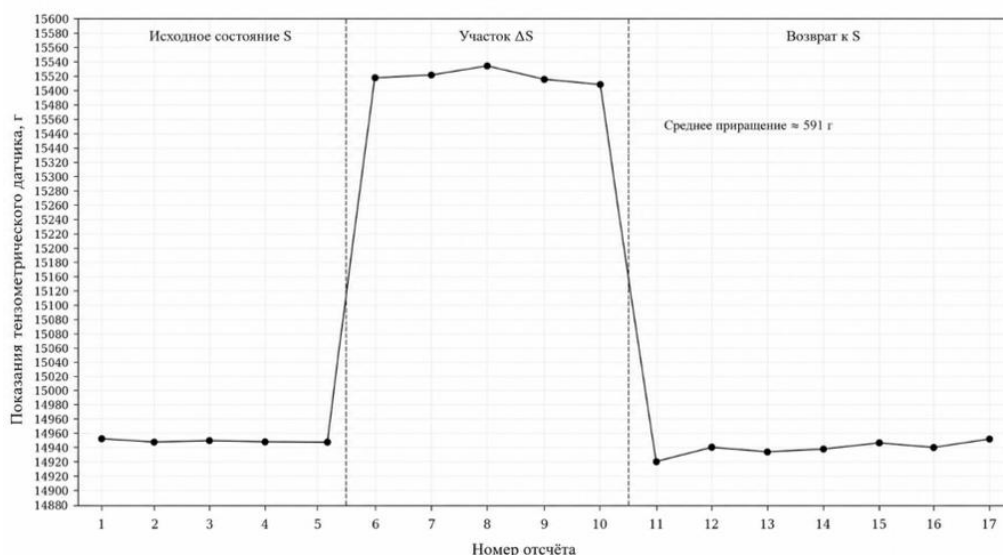


Рисунок 10 - Графическое представление изменения показаний тензометрического датчика при ступенчатом нагружении

Таким образом, по результатам макетной проверки можно утверждать, что выбранная точка контроля информативна, и приращение ΔS может использоваться как диагностический признак изменения нагрузочного состояния проводов контактной подвески.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решалась задача раннего обнаружения гололёдообразования на малодейственных участках контактной сети. Основная идея - использовать тензометрический контроль, чтобы отслеживать изменение нагрузочного состояния проводов и тросов контактной подвески. В рамках работы разработаны расчётные модели компенсирующих устройств, структура и алгоритмы АСКВП, методика применения для персонала.

Выполнен анализ механических нагрузок на провода при гололёде и существующих методов диагностики. Метеорологические методы дают лишь оценку вероятности гололёда, визуальные и оптические фиксируют уже проявившиеся признаки. Методы прямой оценки нагрузки, работающие на воздушных линиях, на контактную сеть без расчётного обоснования не переносятся из-за компенсирующих устройств и особенностей передачи усилий.

На малодейственных участках поезда ходят редко - интервалы от часов до суток. Полагаться на локомотивные бригады как источник информации не приходится. Изменение веса проводов при гололёде начинается до видимых признаков, поэтому раннее выявление должно работать независимо от прохода поездов.

Предложен принцип тензометрического контроля - по приращению усилия в элементах компенсирующего устройства. За диагностический признак принято устойчивое изменение ΔS относительно S_0 . Для полностью компенсированной подвески измерительный узел размещается в зоне компенсирующего устройства, чтобы регистрировать механический отклик без установки оборудования на рабочей части провода. Показания датчика требуют расчётной интерпретации с учётом типа компенсирующего устройства.

Разработаны расчётные модели блочно-полиспастной, двухблочной и трёхблочной систем компенсации, связывающие дополнительную нагрузку ΔG с изменением усилий в точках контроля. Зависимости решают прямую задачу - найти ΔS по ΔG , и обратную - оценить ΔG по ΔS . Появилась математическая основа для интерпретации данных.

Оценка чувствительности показала: для блочно-полиспастной системы достаточно контролировать S . В двухблочной нужно учитывать Q . В трёхблочной при необходимости добавляется T_4 . Результаты определяют состав параметров и требования к калибровке.

Структура АСКВП - измерительно-расчётная система: механический узел, тензоканал, средства преобразования, питания и передачи данных, алгоритмы обработки, расчётное ядро. Цепочка от механического изменения до ΔS и его интерпретации выстроена последовательно.

Алгоритмы предусматривают проверку отсчётов, фильтрацию возмущений, сравнение с S_0 , выделение устойчивого ΔS . Одиночный скачок не является диагностическим признаком. Для надёжности - паспортизация узла, повторная калибровка, контроль S_0 , самодиагностика, учёт эксплуатационных факторов.

Расчётное ядро обеспечивает переход от ΔS к ΔG с выбором модели под тип устройства. Одинаковое ΔS для разных схем - разная ΔG , расчёт ведётся по паспортным данным. ΔG - величина оценочная, рассматривается с устойчивостью ΔS , состоянием канала, параметрами устройства и метеобстановкой.

Методика охватывает выбор участка, паспортизацию, установку и калибровку, формирование S_0 , регистрацию S , выделение ΔS , оценку ΔG , выдачу сообщения. Состояния: "норма", "наблюдение", "предупреждение", "опасный рост", "недостовверные данные". АСКВП - информационная поддержка, не замена регламентов.

На функциональном макете выполнена проверка работоспособности подхода - тарифовка канала и ступенчатое нагружение. Результаты подтверждают информативность выбранной точки контроля и возможность выделения ΔS относительно S_0 .

У подхода есть ограничения: признак косвенный, оценка ΔG зависит от типа и состояния устройства, опыты на макете, а не в реальных условиях. Для внедрения нужны натурные испытания, уточнение зависимостей, накопление статистики, промышленное исполнение узла.

Научный результат - развитие метода раннего обнаружения гололёдообразования по изменению нагрузочного состояния проводов с использованием ΔS и расчётных моделей для трёх типов систем компенсации.

Практическая значимость - модели, структура, алгоритмы, методика для создания АСКВП, обеспечивающей независимый от движения поездов контроль, формирование S_0 , выделение ΔS , оценку ΔG и выдачу сообщений.

Область применения - малодеятельные участки. АСКВП дополняет существующие средства, работая совместно с метеоданными и результатами осмотров.

Цель достигнута, задачи решены. Результаты создают основу для опытной эксплуатации на действующем анкерном участке.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Черных, В. Н.** Некоторые способы выявления гололедно-изморозевых образований на контактной сети электрифицированных железных дорог / В. Н. Черных, А. В. Бойко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4 (88). – С. 170–176.
2. **Черных, В. Н.** Совершенствование системы обнаружения раннего гололёдообразования для контактных сетей электрифицированных железных дорог / В. Н. Черных, В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (94). – С. 110–118.
3. **Черных, В. Н.** Математическое обоснование минимально необходимого количества тензодатчиков для корректного контроля гололедной нагрузки в составе АСКВП / В. А. Осипов, В. Н. Черных // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 10–19.

4. **Черных, В. Н.** Математическое обоснование прямой и обратной зависимостей для определения гололёдной нагрузки в блочных компенсаторах контактной сети / В. Н. Черных // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 37–47. – DOI: 10.46973/0201-727X_2026_2_37.

Патент на изобретение:

5. **Черных, В. Н.** Автоматизированная система контроля веса проводов контактной сети железной дороги : пат. 2823373 С1 Российская Федерация / В. А. Осипов, В. Н. Черных, Н. В. Черных. – № 2024103146; заявл. 08.02.2024; опубл. 22.07.2024.

Публикации в научных журналах и сборниках научных трудов:

6. **Черных, В. Н.** Методы оценки параметров гололёдообразования на контактной сети переменного тока с применением климатической камеры / В. Н. Черных, А. В. Безуглый // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2020. – С. 54–56.

7. **Черных, В. Н.** Особенности современных методов раннего обнаружения гололёдообразования на контактной сети переменного тока / В. Н. Черных, А. В. Бойко // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 55–57.

8. **Черных, В. Н.** Методы раннего обнаружения гололедно-изморозевых образований на контактной сети / В. Н. Черных // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России («ТрансПромЭк-2024») : сборник научных трудов, посвящённый 95-летию Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 294–298.

9. **Черных, В. Н.** Метод раннего обнаружения гололеда на контактной сети / В. Н. Черных // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 12–15.

10. **Черных, В. Н.** Альтернативный способ обнаружения гололёдообразования на контактной сети / В. А. Осипов, В. Н. Черных // Транспорт: наука, образование, производство : материалы Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 117–120.

11. **Черных, В. Н.** Система мониторинга нагрузки в узлах компенсаторов для диагностики гололёда на контактных проводах / В. Н. Черных // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи: сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2025. – С. 69–72.

12. **Черных, В. Н.** Алгоритмы и техническая реализация автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети / В. Н. Черных, В. А. Осипов // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных

трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2025. – С. 103–107.

13. **Черных, В. Н.** К вопросу о раннем обнаружении гололёдообразования на проводах контактной сети по изменению силовых параметров компенсирующего устройства / В. Н. Черных // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2026. – С. 331–336.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты диссертационного исследования получены автором самостоятельно. Работы [4, 8, 9, 11, 13] подготовлены единолично. В публикациях, выполненных в соавторстве, автору принадлежат анализ и систематизация методов выявления гололёдно-изморозевых образований, обоснование тензометрического подхода к раннему обнаружению гололёдообразования, участие в разработке технического решения АСКВП, расчётное обоснование состава тензометрического контроля, а также разработка алгоритмических и технических положений реализации системы [1–3, 5–7, 10, 12].

Черных Владимир Николаевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
КОНТРОЛЯ ВЕСА ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ
ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Подписано в печать . Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ.л. 1,4.
Тираж 100 экз. Заказ №

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС

Адрес университета: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, город Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2