

РОСЖЕЛДОР

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»

ФГБОУ ВО РГУПС



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»

Диссертация
на соискание учёной
степени кандидата
технических наук

Научный
руководитель —
кандидат технических
наук, доцент
В.А. Осипов

г. Ростов-на-Дону 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1	АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОЛЁДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА КОНТАКТНОЙ СЕТИ И ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ 15
1.1	Постановка вопроса 15
1.2	Анализ факторов, определяющих механические нагрузки на провода и тросы контактной сети в условиях гололёдообразования..... 17
1.3	Анализ современных методов обнаружения гололёдно- изморозевых образований на контактной сети и воздушных линиях 21
1.4	Анализ средств диагностики и мониторинга, применяемых на контактной сети 28
1.5	Особенности применения средств диагностики на малодеятельных участках электрифицированных железных дорог..... 30
1.6	Анализ предпосылок применения тензометрического контроля изменения веса проводов контактной подвески 33
1.7	Выводы по главе 35
Глава 2	РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВЕСА ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ 39
2.1	Постановка вопроса 39
2.2	Предлагаемый способ тензометрического контроля изменения веса проводов и тросов контактной подвески 40
2.3	Анализ условий размещения тензометрических датчиков в компенсирующих устройствах контактной сети..... 42
2.4	Уточнение расчётных моделей компенсирующих устройств для определения усилия в точке тензометрического контроля . 47

2.5	Получение практических зависимостей для расчёта приращения усилия в точке тензометрического контроля	61
2.6	Сравнительная оценка расчётной чувствительности тензометрического контроля для различных типов компенсирующих устройств.....	66
2.7	Выводы по главе	70
Глава 3	РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЕСА ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ	72
3.1	Постановка вопроса	72
3.2	Состав измерительного комплекса для тензометрического контроля веса проводов контактной подвески	74
3.3	Измерительный канал тензометрического контроля	76
3.4	Предлагаемый алгоритм регистрации и первичной обработки показаний тензометрического датчика.....	78
3.5	Предлагаемый алгоритм калибровки и контроля достоверности измерений.....	80
3.6	Принцип работы расчётного ядра автоматизированной системы контроля веса проводов	86
3.7	Учёт эксплуатационных факторов при интерпретации данных автоматизированной системы контроля веса проводов.....	89
3.8	Выводы по главе	95
Глава 4	ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЕСА ПРОВОДОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОЛЁДООБРАЗОВАНИЯ НА МАЛОДЕЯТЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ.....	98
4.1	Постановка вопроса	98
4.2	Предпосылки применения автоматизированной системы контроля веса проводов на малодеятельных участках контактной сети	100

4.3	Предлагаемая методика применения автоматизированной системы контроля веса проводов при обнаружении признаков гололёдообразования.....	103
4.4	Предлагаемый алгоритм информационной поддержки принятия решений на основании данных тензометрического контроля.....	108
4.5	Функциональный макет измерительного узла тензометрического контроля веса проводов контактной подвески.....	111
4.6	Результаты проверки информативности выбранной точки тензометрического контроля	115
4.7	Ограничения применения автоматизированной системы контроля веса проводов и направления дальнейших исследований.....	119
4.8	Выводы по главе	123
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	125
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	128
	ПРИЛОЖЕНИЯ	145

ВВЕДЕНИЕ

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 [1, 2]. Особенно это касается тех устройств, повреждение или неправильная работа которых может привести к нарушению электроснабжения и, как следствие, движения поездов.

Контактная сеть является одним из основных элементов системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог. Именно посредством контактной сети осуществляется передача электрической энергии к электроподвижному составу, 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 [3, 4]. 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 [5–8].

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 ухудшению 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 [9–11].

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 [12,

13]. 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 [14–18].

В диссертационной работе в качестве контролируемого параметра предлагается регистрировать изменение усилия в точке крепления неподвижного блока компенсирующего устройства 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 значение силы датчиком 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 [19–22].

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 диссертации.

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 [8, 14, 15, 16, 23 - 28].

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 других авторов [6, 9 - 11, 14, 26, 29 - 32].

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 случаев прекращения движения поездов на малодеятельных участках железной дороги выпадает на осенне-зимний и зимне-весенние 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. [3, 4, 7, 8, 14–19, 23–28].

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 радиии 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 [9–11, 14–18, 29–35].

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. [19–22, 33–35].

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.

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 цели были поставлены и решены 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.

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.

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:

- 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. 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 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».

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 малодеятельных 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 162 страницы, в том числе 123 страницы основного текста. Работа содержит 39 рисунков, 15 таблиц и список литературы, включающий 106 наименований.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОЛЁДНО-ИЗМОРОЗЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА КОНТАКТНОЙ СЕТИ И ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ

1.1 Постановка вопроса

Контактная сеть электрифицированных железных дорог является сложным комплексом тягового электроснабжения. Она состоит из множества элементов опорных и поддерживающих конструкций, но основную её часть составляют провода и несущие тросы. Питание электроподвижных составов пассажирского и грузового потоков происходит за счёт подвижного контакта токоприёмника электроподвижного состава с контактным проводом. С ростом веса, который может транспортировать состав, и увеличением скоростей движения большое внимание отводится факту улучшения контакта полоза токоприёмника с контактным проводом. В противном случае именно в этой области соприкосновения происходит искрение и образование электрической дуги (Рисунок 1.1). Дуга между токоприёмником и контактным проводом приводит к постепенному разрушению графитовых вставок токоприёмника и, как следствие, повышенному износу рабочей части контактного провода. В отличие от пантографа электроподвижного состава, и ввиду некоторых конструктивных особенностей исполнения, контактная сеть не может иметь резерва, и поэтому поддержание такой сложной системы в работоспособном состоянии является важной задачей.

Образование гололёда или даже гололёдно-изморозевых образований на проводах и несущих тросах контактной подвески не только ухудшает контакт между ползцом токоприёмника и контактным проводом, что также приводит к образованию дуги, но еще и увеличивает механическую нагрузку на все поддерживающие и опорные конструкции системы.



Рисунок 1.1 – Нарушение токосъёма при наличии гололёдно-изморозевых отложений на контактном проводе

В совокупности с ветровыми нагрузками, которые чаще имеют скачкообразный характер, это неблагоприятно сказывается на всей контактной подвеске, что может привести к экономическим и технологическим издержкам и затратам.

Такой режим работы контактной сети как «гололёд» либо «гололёд с ветром» может привести к механическому повреждению целого анкерного участка контактной сети, что повлечет за собой большие экономические потери. Помимо очевидных затрат, которые будут направлены на восстановление поврежденных участков, не стоит забывать и о потерях денежных средств из-за нарушения графика движения поездов.

На сегодняшний день существующими методами и системами борьбы с гололёдом и его последствиями для контактной сети задача обнаружения гололёда выполняется в полном объёме, но лишь малая часть из них направлена на решение задачи раннего обнаружения гололёдно-изморозевых образований.

Как известно, действия машиниста электропоезда при визуальном обнаружении им искрения между рабочей частью пантографа и контактным проводом чётко описаны в инструкции, что позволяет своевременно выявлять образование гололёда на ранних стадиях. Машинист поезда выступает в данной схеме как «датчик визуального контроля», однако такой тип обнаружения жестко привязан к графику движения поездов и может по праву считаться достаточным только при условии интенсивного движения на участке железной дороги.

Все перечисленные факты позволяют дать предложение по разработке автоматизированной системы контроля веса проводов (АСКВП) контактной сети железных дорог, основывающейся на явлении тензоэффекта, то есть в основе своего принципа измерения использовать способность твердых материалов при механической деформации изменять свое электрическое сопротивление. На основании регистрации таких изменений возможно судить о прилагаемой к материалу силе и переводить её в вес.

В диссертационной работе предлагается рассмотреть возможность интеграции тензорезистивного датчика на постоянной основе в контактную подвеску малодеятельных участков электрифицированных железных дорог.

1.2 Анализ факторов, определяющих механические нагрузки на провода и тросы контактной сети в условиях гололёдообразования

Контактная подвеска представляет собой сложную систему, которая состоит из опорных и поддерживающих конструкций, а также контактных проводов и несущих тросов, которые постоянно подвержены равномерно распределенной по всей их длине вертикальной статической нагрузке от собственного веса. Учитывая тот факт, что контактная сеть постоянно находится на открытом пространстве, можно говорить о том, что на провода и

тросы контактной подвески при определенных метеорологических условиях действуют дополнительные нагрузки. Их можно условно разделить на две группы: горизонтальные - ветровые нагрузки при его боковом направлении, и вертикальные - увеличение веса проводов и тросов контактной сети от гололёда (Рисунок 1.2) [5, 8, 36, 37, 60–64].

В нормальном режиме работы контактная подвеска воспринимает нагрузку от собственного веса элементов и конструкций и сохраняет заданные параметры стрел провеса за счёт установленных систем компенсации натяжения. Их применение необходимо для минимизации влияния термических деформаций провода, которые возникают при изменении температуры окружающей среды, обеспечивая поддержание заданного натяжения в допустимых пределах [8, 36, 37, 60–62].

Однако наличие систем компенсации не исключает возникновения дополнительных усилий в отдельных элементах системы тягового электроснабжения, особенно при возникновении дополнительных нагрузок, которые не связаны с температурным изменением длины проводов.

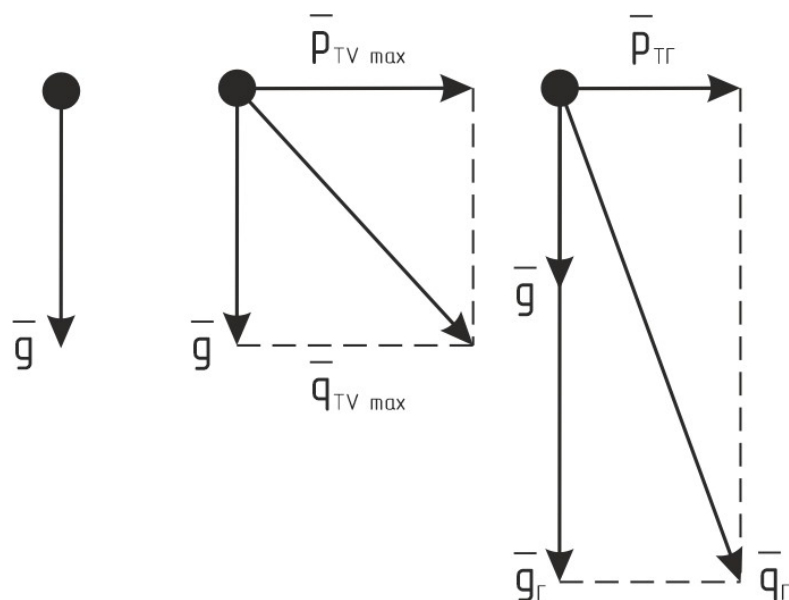


Рисунок 1.2 – Основные виды механических нагрузок, действующих на провода контактной подвески: а) нагрузка от собственного веса; б) режим максимального ветра; в) режим «гололёд с ветром»

Одним из основных климатических воздействий на контактную подвеску является нагрузка, создаваемая ветром, воздействие которого принято считать преимущественно горизонтальным. Сила его воздействия на КС зависит от скорости, рельефа местности, наличия или отсутствия препятствий, которые могут его как разгонять, так и останавливать. При проектировании нового участка или реконструкции действующей контактной сети нагрузка от ветра принимается равной нормативным значениям ветрового давления с учётом района территории, для которой производится расчёт [5, 37]. Негативное влияние ветра проявляется увеличением горизонтальной нагрузки на провода, а в совокупности с гололёдом характер нагрузки изменяется икратно возрастает, что считается одним из наиболее опасных режимов работы – «гололёд с ветром».

Температура воздуха окружающей среды является одним из важных факторов влияния на провода и тросы контактной подвески. В зависимости от её значений меняется степень сжатия, а соответственно и провисание проводов и тросов контактной сети, особенно в совокупности с остальными типами дополнительных нагрузок. Проектирование контактной сети и воздушных линий выполняют с учётом экстремальных для данного района значений температуры окружающей среды предполагаемого места эксплуатации ВЛ.

Применение систем компенсации натяжения позволяет «нивелировать» температурные расширения провода и поддерживать натяжение в заданном диапазоне [36, 37, 61, 62].

Приоритетным, с точки зрения рассмотрения, является фактор образования гололеда на проводах. Его появление приводит к увеличению погонной массы гололёда, что в свою очередь увеличивает дополнительную вертикальную нагрузку. Сложность заключается в том, что в отличие от разнообразных кратковременных воздействий, будь то ветер или токоприёмник ЭПС, гололёд может длительное время оставаться на проводе, даже несмотря на изменение окружающей среды. Именно поэтому гололёдная нагрузка при расчётах считается статической [5, 6, 10, 29, 40, 65–68].

Гололёдные отложения классифицируют в зависимости от их плотности, условий окружающей среды, способствующих образованию, и формы отложений на проводе. Основными видами считаются гололёд, кристаллическая и зернистая изморозь, мокрый снег и смешанные типы отложений. Гололёд имеет наибольшую плотность, труднее разрушается и тем самым представляет наибольшую опасность и нагрузку. Изморозь ниже по плотности, но при длительном нарастании, в сочетании с ветром, способна нанести не меньший ущерб. Налипания мокрого снега на провода не столь сильно изменяют нагрузку. Его опасность заключается в возможном изменении его состояния при перемене температуры, что приводит к изменению его плотности, превращая его в тяжёлое обледеневшее образование [10, 29, 40, 68].

Не только вид и плотность ГИО являются опасным для КС. Не менее важным является и то, как эти образования распределяются по длине анкерного участка. При расчётах гололёдная нагрузка принимается равномерно распределённой по всему проектируемому участку [5,6,37]. В реальности же ГИО редко распределяются равномерно по всему участку, из-за совокупности вышеописанных факторов, таких как: ветер, профиль пути и местность вокруг участка. Именно это усложняет возможность оценки фактического состояния КС опираясь только на расчётные и прогнозные данные.

Следует отметить, что неоднородность распределения гололёда зависит еще и от геометрии проводов и тросов, используемых на КС. Несущий трос имеет более округлую форму и состоит из нескольких жил, к тому же не взаимодействует с токоприёмником, а значит ГИО распределяются по всей его поверхности практически однородно. Контактный провод, напротив, имеет фасонный профиль, и его нижняя часть взаимодействует с токоприёмником, что позволяет избавляться от части ГИО естественным механическим путём. В расчётах КС гололёдная нагрузка на провод считается половиной от несущего троса именно по этой причине. На участках, где интенсивность

движения высокая, это утверждение справедливо, однако на малодейственных такой возможности механического удаления нет.

При большом интервале между движением поездов гололёд может долгое время формироваться на всей поверхности контактного провода, а значит и нагрузка на опорные и поддерживающие конструкции может существенно отличаться от расчётной.

С точки зрения механики появление ГИО изменяет вес провода или троса на единицу длины, что приводит к изменению вертикальной составляющей нагрузки. Это в свою очередь приводит к изменению стрелы провеса и усилий, распределяющихся по всем элементам опорных и поддерживающих конструкций, и компенсирующих устройств. Именно перераспределение этой дополнительной нагрузки и проявляется в узлах компенсирующего устройства, которое реагирует на любое внешнее изменение веса проводов. Это и является обоснованием для применения тензометрического контроля [19,33,57,69-72].

Температура и ветер относятся к факторам механического воздействия, но они лишь создают предпосылки для образования гололёда на контактной подвеске, который приводит к увеличению дополнительной вертикальной нагрузки. Регистрация изменения такой нагрузки может рассматриваться как обоснованная предпосылка для создания автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети.

1.3 Анализ современных методов обнаружения гололёдно-изморозевых образований на контактной сети и воздушных линиях

Способы обнаружения гололёда на устройствах КС и ВЛ частично схожи, и в дальнейшем в разделе будет приведен их сравнительный анализ. Однако следует отметить, что ввиду более конструктивно сложной схемы

исполнения контактная сеть имеет ряд особенностей: взаимодействие с токоприемником ЭПС, наличие компенсирующих устройств и более сложную схему подвески [8,36-39,60–64].

В общем виде можно разделить методы обнаружения ГИО на: визуальные, метеорологические, термодинамические, электрические (емкостные), оптические, локационные, инклинометрические и механические. Такая классификация является условной, потому что в реальности зачастую используется совокупность нескольких методов одновременно [9-11,30,31,43,52,73-86].

Наиболее доступным и относительно простым методом можно считать визуальный контроль со стороны персонала. Это могут быть как машинисты локомотивов, так и электромонтёры участка контактной сети при выполнении обходов с осмотром. Однако отнести такой способ контроля к полноценному методу раннего обнаружения гололёдообразования нельзя: искрение токоприёмника и образование дуги свидетельствуют не о начальной стадии образования, а об уже сформировавшемся слое. Своевременность передачи даже такой информации напрямую зависит от интенсивности движения. Выезд электромонтёра к некоторым отдалённым участкам может быть затруднен, и, учитывая протяжённость участков и количество работников – не всегда представляется возможным.

Методы, которые основаны на регистрации и обработке состояния окружающей среды, благоприятной для образования гололёда, можно отнести к метеорологическим и термодинамическим. В случае с метеорологическим методом (Рисунок 1.3) имеет место быть только регистрация определённых пунктов окружающей среды, и на основе этого построение прогноза о возможном образовании гололёда, тогда как термодинамический способ включает в себя сбор метеорологических данных и значения температуры провода, при помощи специальных датчиков.

Несомненное достоинство этих методов заключается в возможности заблаговременного предупреждения о возможном начале

гололёдообразования, что даёт время на подготовку мер противодействия. Но при этом не фиксируется механическое состояние контролируемой линии, ведь наличие условий для гололёдообразования ещё не означает его наличие.

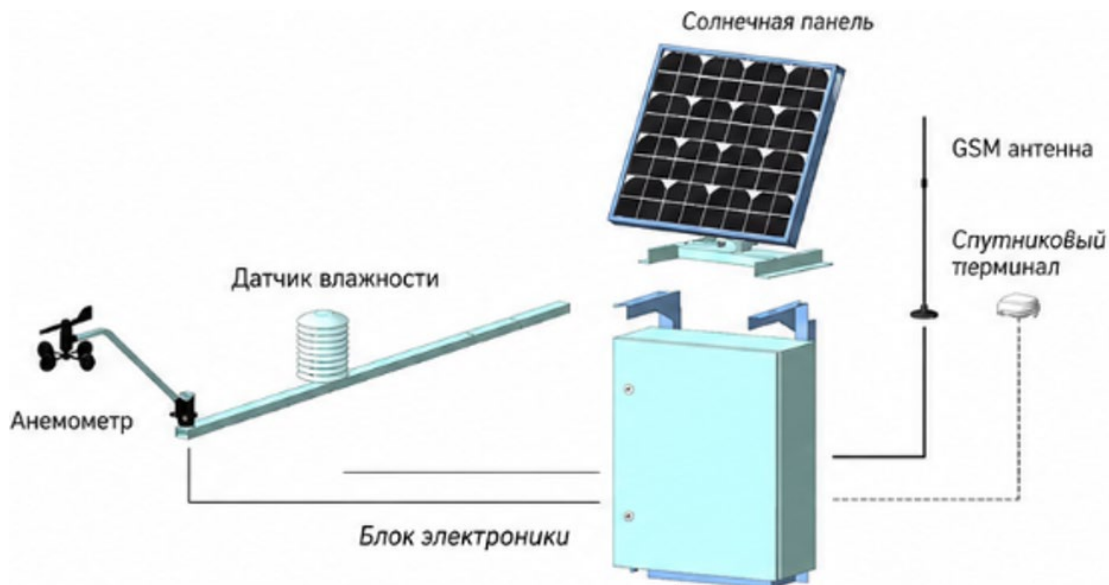


Рисунок 1.3 – Пример системы контроля гололёдоопасной обстановки на основе метеорологических параметров

Суть электрических и емкостных методов заключается в регистрации изменения электрических параметров контролируемого участка или емкостного чувствительного датчика при появлении ГИО. Например, применение емкостного метода (Рисунок 1.4) позволяет судить не только о наличии, но и о толщине таких отложений через отслеживание изменения емкостной связи между обкладками конденсатора.

Несомненным преимуществом является регистрация признака появления отложений в зоне размещения датчика, но это же является его недостатком. Такой датчик является локально размещаемым и фиксирует состояние провода преимущественно в зоне, в которой он расположен, и не позволяет в полной мере оценить ситуацию по длине анкерного участка.

Методы оптического контроля основаны на применении видеокамер, различных оптических меток, систем машинного зрения и лазерного

сканирования. Применение этих средств по отдельности или в совокупности позволяет отслеживать внешнее состояние элементов контактной сети и ВЛ, их геометрию, стрелы провеса и визуально различимые образования [15, 49, 50]. Эти решения хорошо согласуются с общей тенденцией цифровизации, однако достаточно серьезно зависят от условий окружающей среды, поскольку для их работоспособности необходима хорошая видимость для объектива камеры и оптической метки. Следовательно, использование такой системы затрудняется при ухудшении погодных условий, что как раз и провоцирует появление ГИО на проводах.

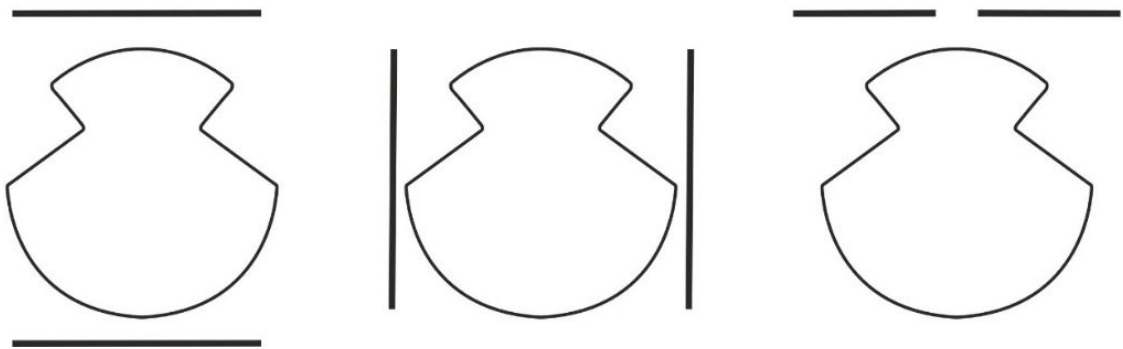


Рисунок 1.4 – Варианты размещения чувствительных элементов ёмкостного контроля ГИО на контактном проводе.

Частотные и локационные методы диагностики наиболее универсальны и их применение позволяет определить любые повреждения линии, а также наличие ГИО на проводах ВЛ. Их суть заключается в подаче импульса в линию (Рисунок 1.5) с последующим определением времени, которое потребуется сигналу для прохождения по линии в прямом и обратном направлениях, при этом любые неоднородности увеличивают время этого прохождения [31, 81, 82, 84, 85].

Одним из главных недостатков можно назвать низкую чувствительность к толщине ГИО, а их использование на КС затруднено ввиду её конструктивных особенностей. Контакт контролируемого провода с

токоприёмником, большое количество струн на один контролируемый участок – всё это усложняет процесс расшифровки полученного сигнала.

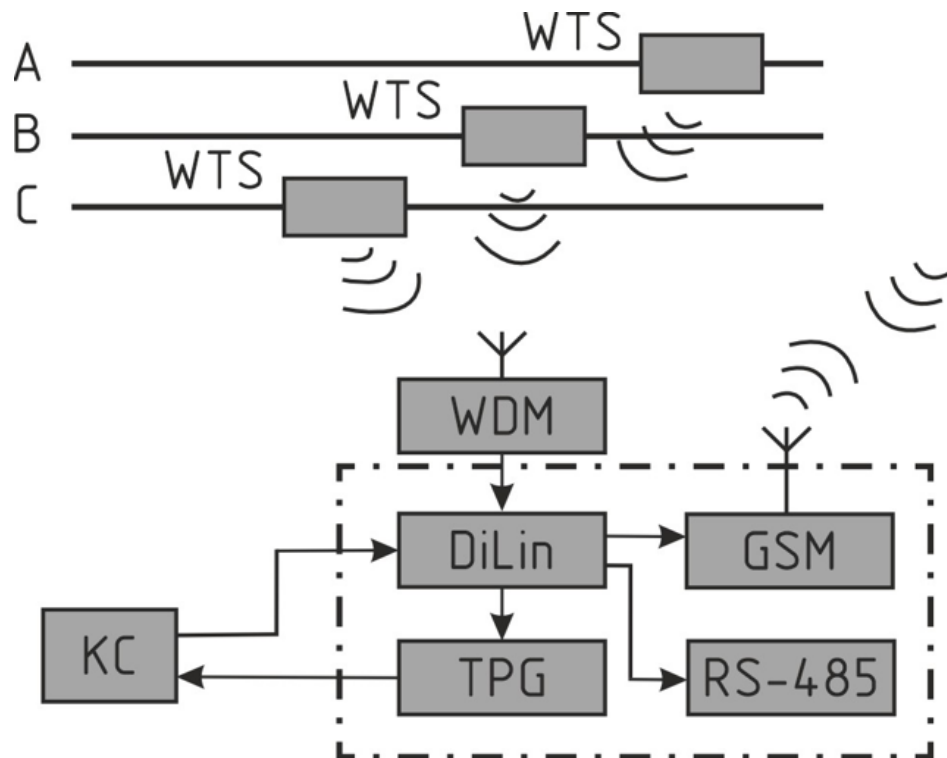


Рисунок 1.5 – Пример структурной схемы локационной системы контроля состояния линии

Метод инклинометрического отслеживания состояния провода применяется преимущественно на воздушной линии и основан на регистрации в режиме реального времени угла наклона разнообразных предметов относительно гравитационного поля Земли (Рисунок 1.6).

В случае с ВЛ «разнообразным предметом» выступает сам провод. Происходит данный эффект «закручивания» из-за естественных механических деформаций провода, что заставляет провод оборачиваться вокруг своей оси [87]. Достоинством такого подхода является прямое измерение отклика провода на изменение его механического состояния, но применение этого метода на КС не представляется возможным ввиду имеющих там систем компенсации натяжения. Контактный провод натянут, а струны дополнительно удерживают его на заданной высоте и предотвращают вращение вокруг своей оси.

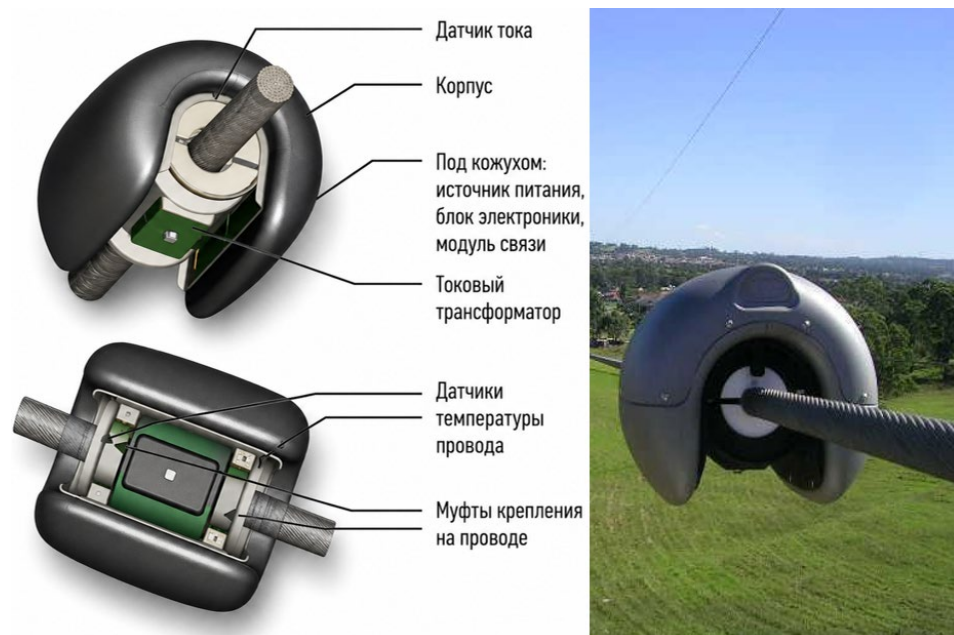


Рисунок 1.6 – Датчики инклинометрического контроля положения провода воздушной линии

Одним из наиболее объективных способов раннего обнаружения ГИО на проводах ВЛ является измерение веса проводов одного или сразу нескольких пролётов (Рисунок 1.7).

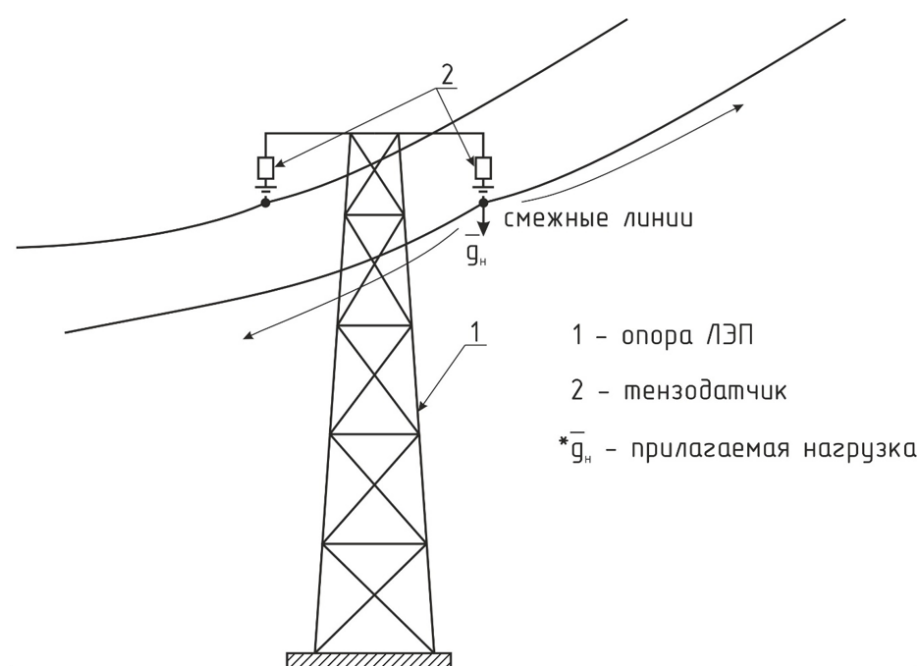


Рисунок 1.7 – Схема регистрации изменения веса проводов воздушной линии с использованием тензодатчиков

В состав таких систем включены специальные датчики-преобразователи силы – тензометрические датчики, принцип работы которых основан на явлении тензоэффекта. Тензоэффект – свойство твердых тел изменять своё внутреннее сопротивление при их деформации. Тензодатчики на воздушных линиях располагают в зависимости от возлагаемой на них задачи. Их расположение между траверсой промежуточной опоры и гирляндой изоляторов позволяет контролировать гололёдную нагрузку на смежных пролетах с двух сторон от установки датчика. При установке тензодатчиков на анкерной опоре представляется возможность контроля продольного тяжения проводов. Стоит упомянуть, что на результаты показаний датчиков влияет и ветровая нагрузка.

Главным достоинством такого способа является высокая чувствительность к любым механическим воздействиям на контролируемый провод, которые изменяют его вес [75, 76, 81, 83, 88, 89].

Не лишена такая система и недостатков при её использовании на ВЛ. Основным принято считать невозможность контроля всей воздушной линии, поскольку один датчик может контролировать только два смежных с ним пролёта. Непосредственное использование таких датчиков на КС весьма затруднено из-за различий в способе подвески фазных проводов, в частности применения на КС систем компенсации натяжения проводов, но именно её наличие и создаёт предпосылки для настоящей работы. Увеличение нагрузки на провода и тросы КС отражается в узлах компенсирующего устройства. Это также открывает возможность размещения датчика не на контактом проводе и не на его рабочей части, а в пределах разрешённых габаритов [19, 20, 53, 54, 94, 95]. Отсюда следует, что при правильно выбранной точке контроля для конкретной системы компенсации изменение силы может быть интерпретировано как признак появления дополнительной нагрузки на проводах.

Для раннего обнаружения ГИО на малодеятельных участках необходимо рассматривать не только методы регистрации внешних изменений контактной

сети, но и контроль за изменением её нагрузочного состояния, что создаёт все основания для дальнейшего рассмотрения и анализа средств диагностики и мониторинга, которые применяются именно на контактной сети, с последующим обоснованием применения тензодатчиков как средства контроля веса её проводов.

1.4 Анализ средств диагностики и мониторинга, применяемых на контактной сети

Средства диагностики и мониторинга контактной сети предназначены для неразрушающего контроля технического состояния её элементов, контролем геометрических параметров и качества токосъёма и своевременного выявления отклонений от нормального режима работы [3, 4, 14–16, 90], т. е. более широкий спектр параметров контроля, а не только за гололёдной нагрузкой.

Комплексным и наиболее широко применяемым методом является осуществление периодических выездов специальной вагон-лаборатории, которая позволяет отслеживать сразу несколько параметров, среди которых: высота подвеса, положение фиксаторов (зигзаг) относительно профиля пути, износ самого контактного провода, качество токосъёма и др. [3, 4, 91–93]. Его основным недостатком является периодичность её прохода, т. е. состояние контактной сети проверяется именно в момент его движения, а не постоянно.

С точки зрения решения задач раннего обнаружения ГИО наибольший интерес представляют средства и методы, которые оценивают механическое состояние контактной сети без установленной периодичности. Одним из таких методов выступает контроль перемещения грузов компенсирующего устройства (Рисунок 1.8).

Изменение высоты нижнего груза относительно головки рельса показывает реакцию системы компенсации на внешнее воздействие проводом. Сюда относится и изменение его длины при температурных колебаниях, и появление дополнительной нагрузки, что может быть применено в качестве диагностического признака для определения наличия ГИО [19, 36, 37]. Но стоит отметить, что такой способ имеет достаточно низкую чувствительность к начальным моментам образования ГИО на проводах КС, по перемещению грузов можно судить о возникновении дополнительной нагрузки, опять же в таком случае за грузами необходим постоянный визуальный контроль.

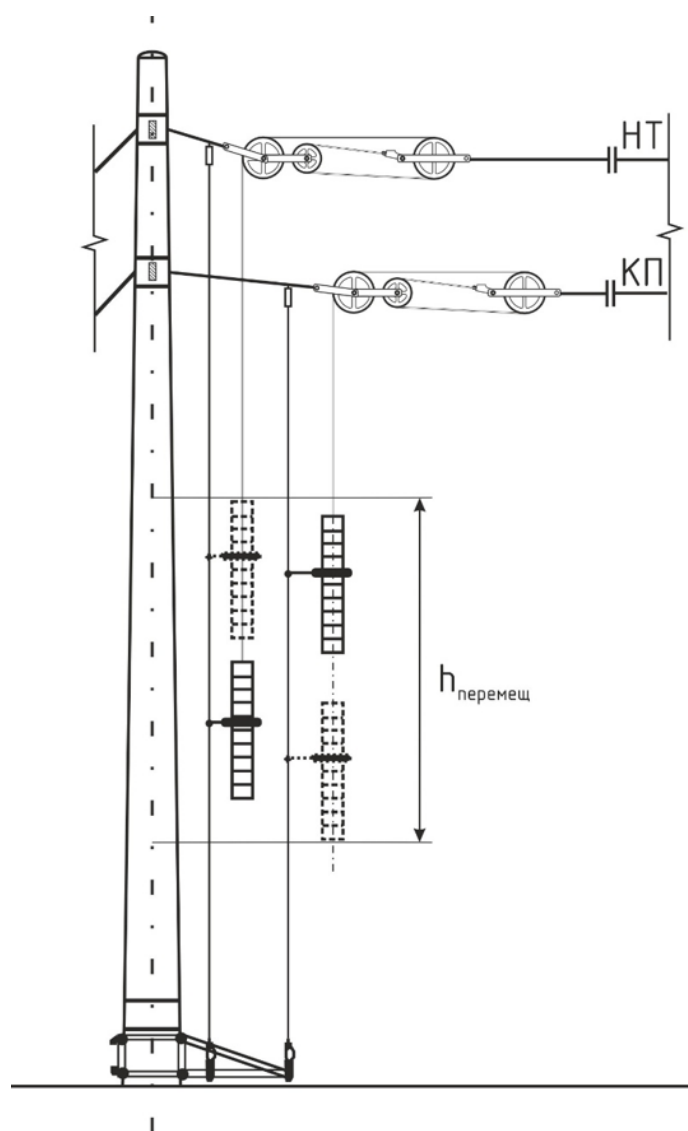


Рисунок 1.8 – Изменение высоты грузов компенсации от внешнего воздействия

С точки зрения наибольшей информативности контроль за величиной усилия в точке компенсирующего устройства представляется более перспективным. Главным отличием от контроля за перемещением грузов является возможность непосредственного выявления изменения состояния нагрузки узлов компенсатора. В случае с контактной подвеской такой подход наиболее приемлем, поскольку практически любое изменение со стороны контролируемого провода (длина, вес, обрыв) отражается на компенсаторе.

Существующие средства диагностики и мониторинга в большинстве своём позволяют контролировать обширный спектр технических параметров контактной сети, но не полностью решают задачу раннего обнаружения ГИО. Наиболее близкими к обозначенной задаче являются средства механического контроля проводов, применяемые на воздушных линиях и зарекомендовавшие себя как надёжный источник информации.

1.5 Особенности применения средств диагностики на малодеятельных участках электрифицированных железных дорог

На малодеятельных участках электрифицированных железных дорог движение поездов значительно менее интенсивное. Интервалы между проходами ЭПС здесь больше, поэтому и возможность своевременно заметить изменения в состоянии контактной сети снижается. Сама контактная сеть при этом работает в тех же погодных условиях, что и на загруженных участках, где интенсивность движения достаточно высока. Она также подвержена воздействию ветра, атмосферных осадков, перепадов температуры, гололёду и другим природным факторам. Но информация о её реальном состоянии в конкретный момент времени поступает персоналу не так часто.

На участках высокой интенсивности движения большую часть неисправностей или неблагоприятных явлений могут заметить локомотивные

бригады. Например, проблемы с токосъёмом зачастую проявляются в виде искрения или электрической дуги, которая видна машинисту. Такие случаи уже рассматривались ранее и показаны на рисунке 1.1. На малодеятельном участке рассчитывать на такой контроль сложнее. В лучшем случае между поездами проходит несколько часов и начало образования гололёда всё это время может оставаться незамеченным. О возникшей проблеме энергодиспетчер узнает только после прохода следующего поезда либо уже тогда, когда гололёд приведёт к заметному ухудшению токосъёма или разрушению элементов контактной сети [6, 12, 13].

Плановые осмотры силами монтеров ЭЧК и периодическая диагностика эту проблему также полностью не решают. Они позволяют достаточно точно оценить состояние контактной сети во время проведения самой проверки, но между двумя проверками ситуация может кардинально измениться. В рамках текущего технического обслуживания КС такой порядок работы вполне оправдан, но для раннего обнаружения гололёда этого уже недостаточно. Отложения могут начать формироваться после завершения осмотра, и к следующей проверке заметно увеличить нагрузку на провода и тросы [3, 4, 91–93].

Есть и ещё одна особенность - гололёд не обязательно появляется одинаково на всём протяжении анкерного участка. Даже при одинаковых погодных условиях на соседних участках количество и плотность отложений могут заметно различаться. Здесь каждая мелочь играет важную роль, например, рельеф, наличие открытых и продуваемых мест, расположение и высота профиля пути, влажность воздуха, температура провода и другие климатические условия. Поэтому один только метеорологический прогноз не даёт точного представления о том, в каком конкретно механическом состоянии находится контактная подвеска на определённом анкерном участке. То же самое относится и к данным, полученным с соседних участков [5, 6, 43, 65–68].

Поэтому для малодеятельных участков нужен контроль, который не зависит от количества поездов. Он должен уметь вести непрерывный мониторинг, либо через заданные интервалы времени. Важно и то, что желательно контролировать не только видимые признаки образования гололёда, гораздо полезнее отслеживать параметры, которые меняются вместе с изменением механического состояния контактной подвески. Это могут быть положение грузов компенсирующего устройства, натяжение проводов, а также усилия, возникающие в отдельных элементах КС [19, 94–104].

Ранее, в предыдущем разделе, уже рассматривалась возможность использования перемещения грузов компенсирующего устройства в качестве диагностического признака. Такой способ контроля действительно позволяет заметить изменение состояния подвески, но у него есть свои ограничения. Положение грузов зависит не только от дополнительного веса гололёда, оно изменяется при температурных колебаниях, зависит от трения в самих блоках, состояния канатов компенсатора, его конструкции и ряда других причин. Поэтому по одной только высоте перемещения грузов сложно уверенно определить именно начало гололёдообразования.

Наиболее информативным в этом случае может быть контроль усилия в одной из точек механической части системы контактной подвески. При образовании отложений вес проводов и тросов возрастает, а вместе с ним меняется и нагрузка, передаваемая на элементы системы. Если такое изменение фиксировать напрямую, появляется возможность судить уже не только о перемещении отдельных элементов, а об изменении самой нагрузки, воспринимаемой компенсирующим устройством. Для малодеятельных участков это особенно важно: измерение не привязано к движению поездов и может выполняться в любое время.

В результате становится возможным заметить развитие такого негативного процесса как гололёд, раньше, чем он приведёт к неблагоприятным последствиям.

Таким образом, на малодейственных участках традиционных способов наблюдения часто оказывается недостаточно. Визуальный контроль зависит от прохождения поездов или от персонала энергоучастка, а периодическая диагностика вагон-лаборатории показывает состояние контактной сети только в момент проверки. Поэтому для таких условий целесообразно применять средства постоянного контроля, которые могут работать независимо от других факторов контроля. Одним из возможных вариантов такого контроля является тензометрическое измерение изменения веса проводов и тросов контактной подвески. Оно позволяет фиксировать появление дополнительной нагрузки и может использоваться для раннего обнаружения гололёдообразования.

1.6 Анализ предпосылок применения тензометрического контроля изменения веса проводов контактной подвески

Методы тензометрического контроля достаточно широко применяются для регистрации изменения механического усилия в различных системах. В энергетике подобное решение нашло свой отклик, в том числе для контроля нагрузки на провода воздушных линий. Один из таких вариантов применения тензометрического датчика был рассмотрен ранее и показан на рисунке 1.7 [75, 76, 81, 83, 88, 89].

В рассмотренной схеме изменение веса провода, ввиду конструктивного исполнения воздушных линий, воспринимается измерительным элементом непосредственно. Использование такого прямого включения тензодатчика на контактной сети не представляется возможным хотя бы потому, что провод, используемый здесь, постоянно взаимодействует с ползком токоприёмника ЭПС, а следовательно, размещение на нём дополнительного измерительного оборудования может повлиять на условия её нормальной эксплуатации [3, 4, 36, 37].

В то же время для определения изменения веса контактного провода не обязательно устанавливать тензодатчик непосредственно на самом проводе или где-то в габарите движения поезда. При детальном рассмотрении компенсирующего устройства и его работы при нагрузке на анкерный участок можно заметить, что вся возникающая дополнительная нагрузка передаётся через элементы контактной подвески и далее гасится им же через блоки и тросы, то есть сам провод практически не изменяет свое положение относительно головки рельса. Это наблюдение наводит на мысль, что измерение можно выполнять в одной из точек этой самой системы компенсации.

Именно компенсирующее устройство представляет интерес с точки зрения размещения тензометрического датчика. И для этого есть все предпосылки: оно уже включено в схему контактной подвески и реагирует на все усилия от контактного провода или несущего троса. При этом его элементы расположены вне рабочей зоны взаимодействия контактного провода с токоприёмником, что позволяет установить измерительный узел без внесения изменений непосредственно в зону, где происходит отбор электроэнергии [19, 20, 53, 54, 94, 95].

При правильно подобранной схеме установки тензометрический датчик фактически измеряет не вес контактного провода, а усилие в выбранной точке крепления компенсирующего устройства. Поэтому между увеличением веса проводов и показаниями датчика должна существовать определённая зависимость, вид которой определяется типом компенсатора и тем, в какой конкретно точке выполняется измерение.

Это обстоятельство имеет важное значение, поскольку измерительный датчик нельзя просто включить в любой точке системы компенсации. В таком случае его показания будут характеризовать усилие только в месте установки, а не сумму всех воспринимаемых компенсатором сил. Чтобы по этим данным можно было определить изменение веса контактной подвески, необходимо

учитывать передачу усилий через блоки и канаты компенсирующего устройства, его тип, количество блоков и ряд других немаловажных факторов.

Например, если сравнивать простую блочную систему компенсации с блочно-полиспастной, то первым делом будет видна разница в количестве точек крепления самой системы к анкерной опоре, однако передаточное число у блочных систем выше, при меньшем количестве блоков.

Кроме самой величины усилия необходимо учитывать и место установки тензометрического датчика, так как в разных точках одной системы, блочной, например, изменение нагрузки может проявляться по-разному. Поэтому точка осуществления контроля должна выбираться так, чтобы изменение веса проводов вызывало достаточное изменение измеряемого усилия.

Важно также помнить не только о чувствительности будущей системы, но и о соблюдении нормального режима работы и неразрушающего контроля контактной подвески, а заодно и удобство будущего ремонта и настройки оборудования без необходимости закрывать участок для движения на время проведения технических работ.

Поэтому для применения тензометрического метода измерения нагрузки на контактной сети требуется установить количественную связь между изменением веса провода и усилием, воспринимаемым датчиком. Такая связь должна учитывать конструктивные особенности используемого компенсирующего устройства и расположение измерительного элемента в его структуре [19, 57, 69–72].

1.7 Выводы по главе

В настоящей главе были рассмотрены основные причины образования ГИО на проводах контактной сети и ВЛ, их влияние на работу энергосистем. В ходе исследования выявлено, что при нарастании ГИО увеличивается

погонный вес проводов, а вместе с ним меняется состояние контактной подвески. Это в дальнейшем может привести к значительному ухудшению токоёмкости, электротермической деградации токоприёмника и провода из-за появления искрений, и даже пережогу контактного провода при возникновении дуги.

Опираясь только на метеорологические данные, можно определить вероятность возникновения гололёда, однако по температуре окружающей среды, её влажности, скорости ветра или наличию осадков нельзя точно установить фактическое состояние проводов на контролируемом участке, поскольку даже при относительно одинаковых погодных условиях толщина и характер отложений могут отличаться в зависимости от локальных условий, например наличие насаждений, построек или, наоборот, открытой местности. Поэтому для методов раннего обнаружения гололёдообразования контроль только погодных условий, без учёта изменений, происходящих непосредственно на самом проводе контактной подвески, не может рассматриваться как полноценный метод контроля.

Проанализировав существующие методы и способы раннего обнаружения гололёдообразования, был сделан вывод, что большая часть применяемых на сегодня диагностических средств опирается на теоретические прогнозы, которые формируются при совпадении некоторых контролируемых параметров. Оставшаяся часть фокусируется на фиксации уже образовавшегося гололёда посредством применения технических средств визуального контроля, например веб-камеры, оптические метки и иные средства. Рассмотрев некоторые решения, которые позволяют оценивать непосредственную нагрузку на провод, был сделан вывод, что они преимущественно разработаны и применяются для ЛЭП. Их применение на контактной сети напрямую не представляется возможным и требует учёта конструкции контактной подвески, а именно наличия в её составе компенсирующих устройств.

Отдельного внимания проблема раннего обнаружения гололёда требует на малоделятельных участках электрифицированных железных дорог. На таких участках межпоездные интервалы могут составлять от нескольких часов до нескольких суток, тогда как слою ГИО, способному спровоцировать механически тяжёлый режим работы, достаточно нескольких часов. Именно из-за длительных межпоездных интервалов невозможно отследить реальную картину на таком участке, опираясь только на данный способ контроля. Для этих участков необходим технический комплекс средств, который будет способен осуществлять контроль независимо от плановых осмотров работников энергоучастка и информации от локомотивных бригад.

Опираясь на данные проведённого анализа, можно сделать вывод, что наиболее перспективным параметром для отслеживания гололёдообразования на КС предлагается регистрация изменения веса ее проводов в узлах компенсирующего устройства.

Компенсирующая подвеска за счёт своей конструкции распределяет дополнительную нагрузку через элементы компенсирующего устройства, что позволяет рассматривать его как возможное место установки измерительного оборудования, при этом сам датчик может быть вынесен за пределы зоны токосъёма и не оказывать влияния на взаимодействие контактного провода с токоприёмником.

Для регистрации изменения усилия в выбранной точке компенсирующего устройства предлагается использование тензометрического датчика. Важно отметить, что его показания нельзя напрямую принимать за величину дополнительного веса контактного провода без уточнения типа компенсатора, его схемы, количества блоков и остальных факторов. Поэтому дальнейшее применение такого способа требует определения зависимости между изменением веса проводов контактной подвески и усилием, которое будет воспринимать измерительный элемент в точке крепления его в компенсирующем устройстве.

Полученные аналитические данные позволяют перейти к рассмотрению механической работы различных типов компенсирующих устройств, через их математические модели в состоянии статики, а также как увеличение веса проводов меняет нагрузку в узлах крепления канатов и неподвижных роликов к анкерной опоре, для определения точек, в которых изменение нагрузки может быть зарегистрировано тензометрическим датчиком и представлено как информативная точка.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВЕСА ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ

2.1 Постановка вопроса

В первой главе было показано, что для обнаружения начала гололёдообразования на контактной сети возможно использовать изменение силового состояния контактной подвески. Для регистрации такого изменения предлагается применять тензометрический датчик.

При увеличении веса проводов от гололёдно-изморозевых отложений в элементах контактной подвески и компенсирующих устройств изменяются действующие усилия. Следовательно, необходимо определить зависимость между дополнительной нагрузкой ΔG и изменением силы ΔS , которое может быть зарегистрировано датчиком.

Рассмотрим две задачи. В первой при известном значении дополнительной нагрузки ΔG необходимо определить соответствующее изменение усилия ΔS . Вторая задача является обратной - по измеренному датчиком значению ΔS определить величину дополнительной нагрузки ΔG [106].

Для практического применения системы больший интерес представляет вторая задача. После установки на контактной сети тензометрический датчик будет измерять изменение усилия, а по полученному значению необходимо будет определить дополнительный вес проводов.

Для решения поставленной задачи далее рассмотрим возможные места установки тензометрических датчиков при различных способах компенсации натяжения контактной подвески. После этого выполним расчёт для трёх типов

компенсирующих устройств: блочно-полиспастного, двухблочного и трёхблочного [105].

2.2 Предлагаемый способ тензометрического контроля изменения веса проводов и тросов контактной подвески

Способ контроля изменения веса проводов и тросов контактной сети предлагается реализовать с использованием тензометрического датчика, установленного где-то в схеме компенсирующего устройства. При образовании гололёдно-изморозевых отложений вес контактной подвески возрастает, вследствие чего изменяется распределение усилий во всей системе компенсации. Такое изменение может быть зарегистрировано датчиком в виде изменения силы S . В отличие от способов, описанных ранее в работе, в данном случае контролируемой величиной является усилие в выбранной точке компенсирующего устройства.

Для этого необходимо определить ту самую точку установки тензометрического датчика, в которой изменение веса проводов приводит к измеряемому изменению усилия. Возможность использования силовых параметров для оценки состояния проводов рассматривалась ранее в работах [19 - 21, 53, 54, 94 – 96].

При отсутствии гололёдно-изморозевых отложений фиксируется значение усилия S , соответствующее нормальному состоянию контактной подвески без ГИО. Полученное значение принимается в качестве исходного для данного компенсирующего устройства, и задаётся как базовое.

Как только гололёдно-изморозевые отложения начинают образовываться, возникает дополнительная нагрузка, ΔG , вследствие чего изменяется усилие во всем компенсаторе и, соответственно, в точке установки

датчика. Разность между текущим и базовым значениями силы определяет приращение ΔS , связанное с увеличением веса проводов от ГИО (Рисунок 2.1).

Следует учитывать, что по величине ΔS определить дополнительную нагрузку ΔG напрямую, без учёта типа и конструкции компенсирующего устройства, нельзя. При всех остальных одинаковых параметрах контролируемого участка, увеличении веса проводов не даст изменение усилия в блочно-полиспастной, двухблочной и трёхблочной системах одинаковым. Поэтому для каждого типа компенсатора необходимо получить зависимость между дополнительной нагрузкой ΔG и соответствующим ей изменением усилия ΔS в конкретной точке.

Размещение датчика непосредственно на рабочей части контактного провода ограничено и связано это с воздействием высокого напряжения, взаимодействием с токоприёмником контактного провода и ограничениями на установку дополнительного оборудования. В зоне компенсирующего устройства перечисленные ограничения проявляются в меньшей степени, часть из которых в принципе не рассматривается. Поэтому измерительный узел предлагается размещать в выбранной точке компенсирующего устройства.

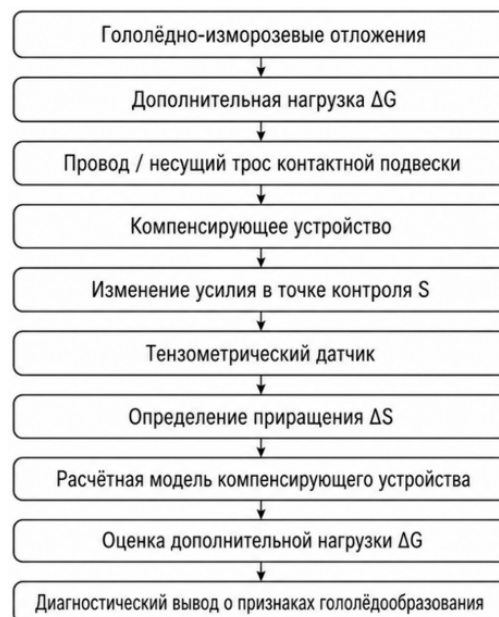


Рисунок 2.1. Принцип тензометрического контроля изменения веса проводов и тросов контактной подвески

Итак, предлагаемый метод тензометрического контроля проводов и тросов контактной подвески сводится к регистрации приращения усилия в выбранной точке компенсирующего устройства и последующей расчётной интерпретации этого приращения как признака появления дополнительной вертикальной нагрузки.

Такой подход связывает физический процесс гололёдообразования с измеряемым параметром, который можно использовать в автоматизированной системе контроля веса проводов контактной сети [33, 35, 55–59].

2.3 Анализ условий размещения тензометрических датчиков в компенсирующих устройствах контактной сети

Для установки тензометрического датчика необходимо выбрать точку, в которой изменение веса проводов будет вызывать изменение усилия. При этом датчик не должен влиять на нормальную работу контактной подвески [3, 4, 7, 36, 37].

Рассмотрим сначала некомпенсированную контактную подвеску. В ней контактный провод закреплён на анкерных опорах, компенсация натяжения отсутствует. Общий вид такой подвески показан на рисунке 2.2.

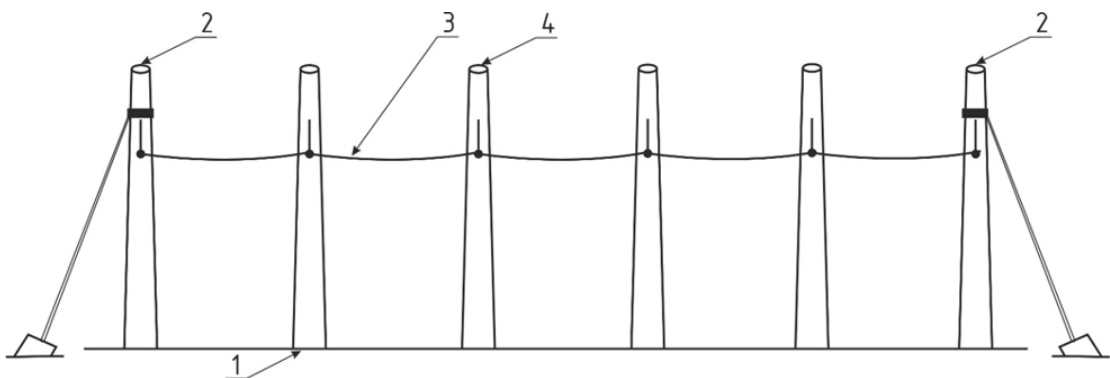


Рисунок 2.2 - Некомпенсированная контактная подвеска

1 - рельс, 2 - анкерная опора, 3 - контактный провод, 4 - опора

Датчик в данном случае можно установить в месте крепления провода к анкерной опоре. При увеличении веса провода усилие в этой точке также изменится. Подробно некомпенсированную подвеску далее рассматривать не будем. На железнодорожной контактной сети в основном применяются подвески с компенсацией натяжения.

Следующей рассмотрим полукompенсированную подвеску. В ней компенсируется натяжение контактного провода, а несущий трос остаётся закреплённым на анкерной опоре. Схема подвески представлена на рисунке 2.3.

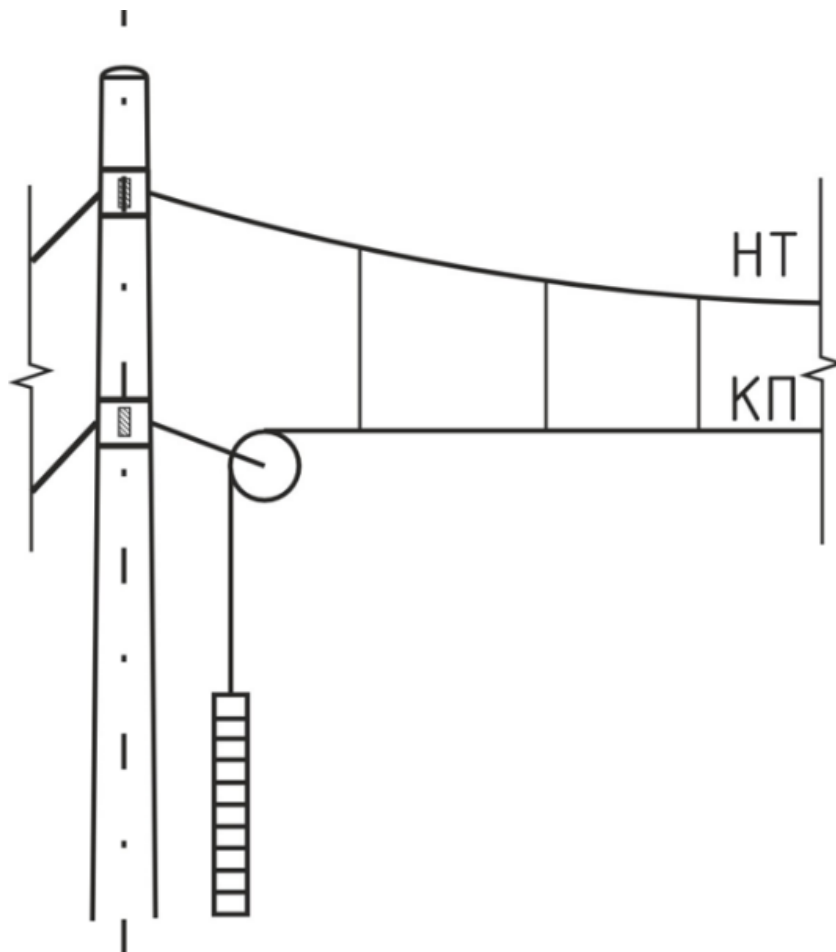


Рисунок 2.3 - Схема полукompенсированной контактной подвески

В этом случае датчик можно установить в месте крепления несущего троса. При изменении веса подвески будет изменяться усилие в тросе. Точка его крепления при этом остаётся неподвижной. Вариант установки датчика показан на рисунке 2.4.

Далее рассмотрим полностью компенсированную контактную подвеску. Здесь компенсируется натяжение контактного провода и несущего троса. Для них могут применяться отдельные компенсаторы. Другой вариант - совместная компенсация через планку "коромысло". Такая схема показана на рисунке 2.5.

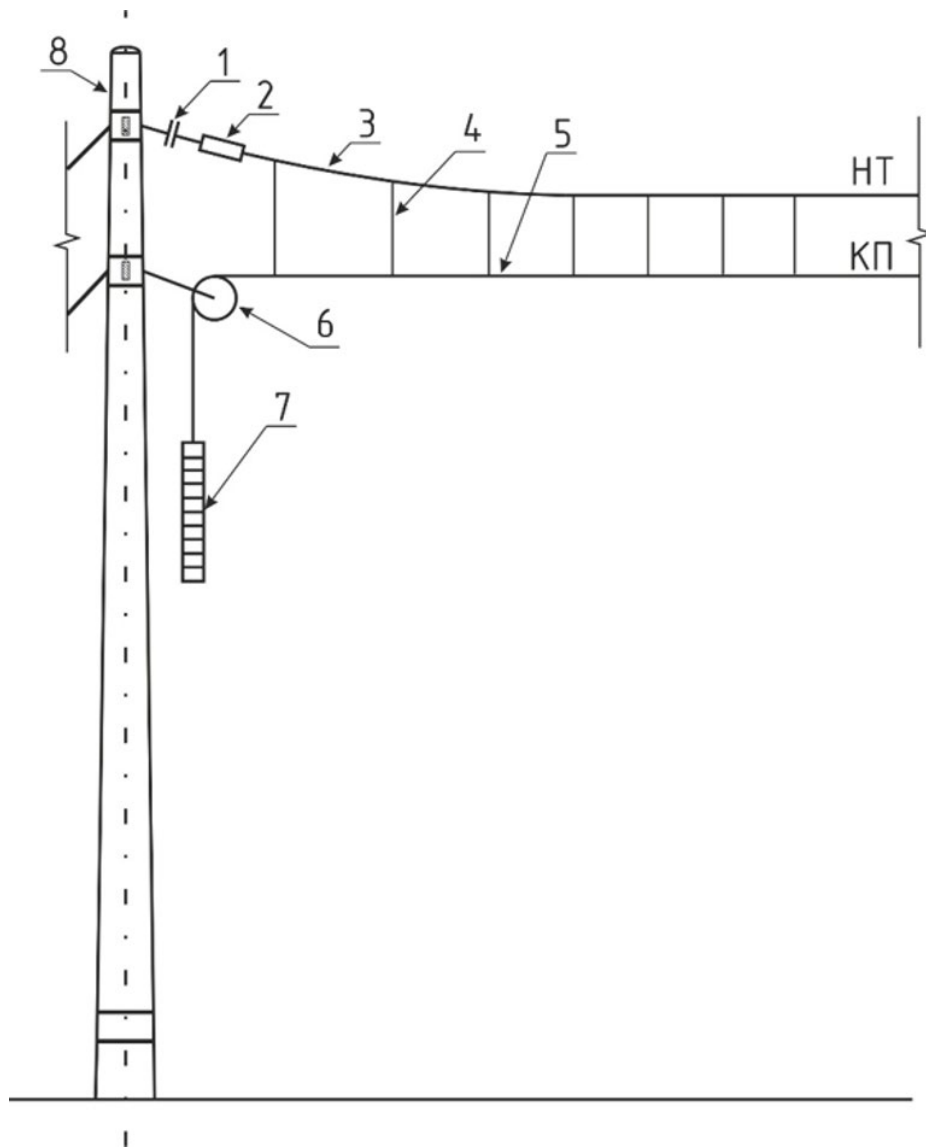


Рисунок 2.4 - Схема установки тензометрического датчика в полукompенсированной контактной подвеске, где: 1 - изолятор, 2 - тензодатчик, 3 - несущий трос, 4 - струна, 5 - контактный провод, 6 - ролик компенсатора натяжения, 7 - груз компенсатора, 8 – анкерная опора

Устанавливать датчик непосредственно на контактном проводе нежелательно [3, 4, 7, 14, 15]. Контактный провод находится под напряжением и взаимодействует с токоприёмником. Несущий трос при полной компенсации

также связан с компенсатором. Поэтому рассмотрим установку датчика в компенсирующем устройстве.

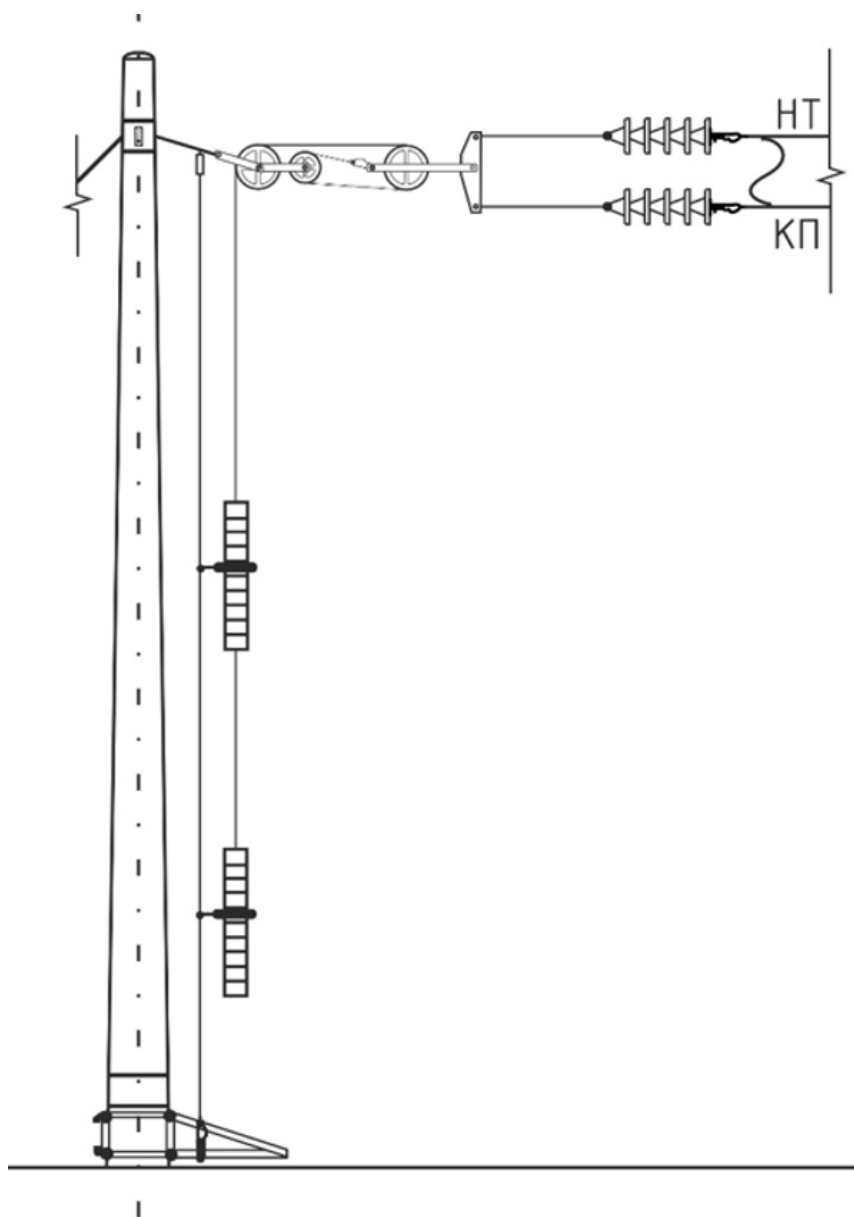


Рисунок 2.5 - Анкерная опора с компенсатором типа КБП-3-30 с совмещённой компенсацией несущего троса и контактного провода

При увеличении веса проводов изменяется нагрузка, передаваемая на компенсатор. Для измерения этого изменения можно использовать место крепления неподвижного блока к анкерной опоре. В этой точке действует усилие от ветвей каната компенсатора. При изменении веса подвески изменится и это усилие.

Возможность измерения усилий в элементах контактной подвески рассматривалась в работах [19, 71, 72, 94-96]. Схема установки датчика приведена на рисунке 2.6.

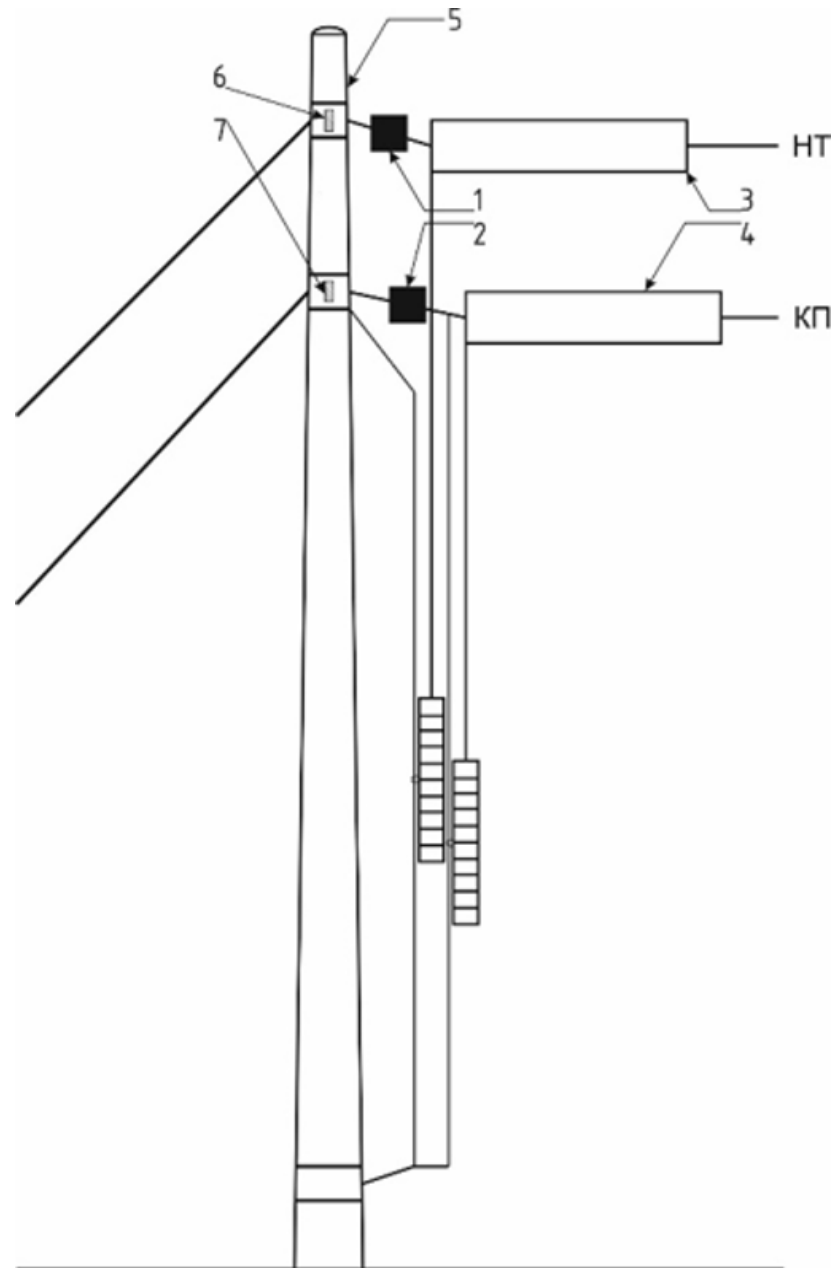


Рисунок 2.6 - Тензометрический датчик в системе полной компенсации натяжения

Рассматриваемые компенсаторы имеют разную схему. В блочно-полиспастном, двухблочном и трёхблочном компенсаторах различаются количество блоков и положение ветвей каната. Поэтому при одинаковом увеличении веса проводов изменение усилия S будет различным.

Для каждого компенсатора необходимо получить зависимость между дополнительной нагрузкой ΔG и изменением усилия ΔS .

Дальнейшие расчёты будем выполнять для полностью компенсированной подвески. Тензометрический датчик при этом будем устанавливать между анкерной опорой и одним из блоков компенсатора.

2.4 Уточнение расчётных моделей компенсирующих устройств для определения усилия в точке тензометрического контроля

После выбора мест установки датчиков необходимо определить, как изменение веса проводов будет влиять на усилие в выбранной точке компенсатора. Для этого рассмотрим компенсирующее устройство как систему блоков и канатов, через которые усилие от контактной подвески передаётся на анкерную опору. При выполнении расчётов будем использовать основные положения механического расчёта контактных подвесок [8, 28, 60–64, 69–72].

Необходимо учитывать, что сила S , измеряемая тензометрическим датчиком, не является непосредственно дополнительным весом проводов. На её значение кроме нагрузки от подвески влияют вес грузов компенсатора, направление ветвей каната и сама схема передачи усилий. Следовательно, для разных типов компенсирующих устройств зависимость между ΔG и ΔS будет различаться.

Будем считать процесс образования гололёдно-изморозевых отложений медленно изменяющимся. В связи с этим при составлении расчётных схем влиянием динамических процессов, трением в блоках и упругой деформацией канатов на первом этапе пренебрежём. В дальнейшем влияние этих факторов может быть учтено при обработке показаний датчиков [5, 6, 10, 29, 40, 65–68].

Первой рассмотрим блочно-полиспадную систему компенсации натяжения. В такой системе усилие от контактной подвески через несколько

ветвей каната передаётся на блоки компенсатора. Одной из точек, в которой возможно измерять изменение этого усилия, является место крепления неподвижного блока к анкерной опоре. Силовая схема рассматриваемого компенсатора приведена на рисунке 2.7.

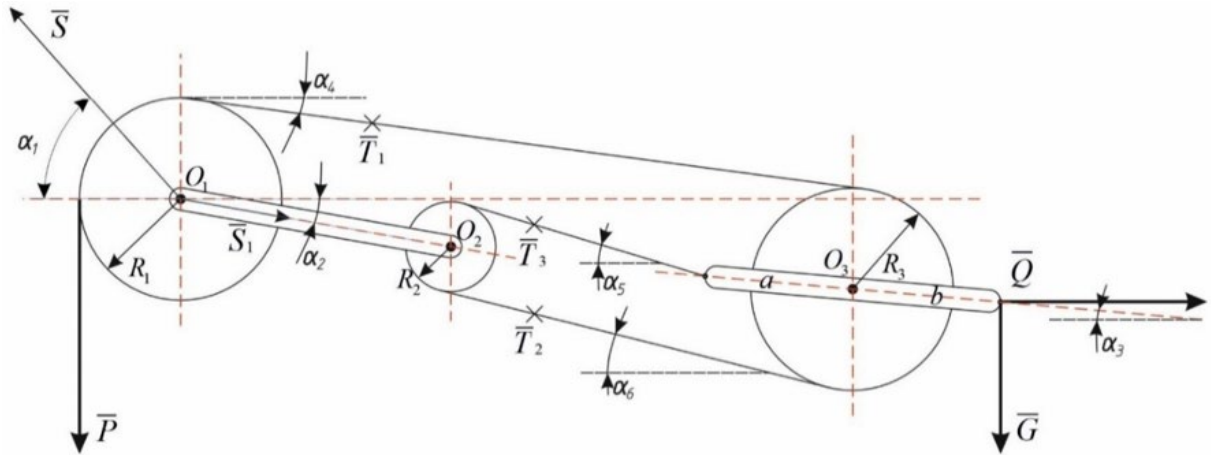


Рисунок 2.7 - Силовая схема блочно-полиспастного компенсатора

Обозначим:

S - сила, передаваемая от подвески (контактного провода и/или троса) на блок;

P - усилие, создаваемое грузом (вес);

Q - результирующая сила, передаваемая системой на опору через неподвижный блок;

ΔG - приращение веса подвески от гололёда;

G - суммарный вес проводов в нормальных условиях.

Для представленной схемы запишем уравнения равновесия блоков и условия равенства сил тяжения в ветвях каната.

Система уравнений сил и моментов для точки O_1 :

$$\sum F_{kx} = 0: -S \cdot \cos \alpha_1 + T_1 \cdot \cos \alpha_4 + S_1 \cdot \cos \alpha_2 = 0 \quad (2.1)$$

$$\sum F_{ky} = 0: -P + S \cdot \sin \alpha_1 - T_1 \cdot \sin \alpha_4 - S_1 \cdot \sin \alpha_2 = 0 \quad (2.2)$$

$$\sum M = 0: T_1 \cdot R_1 - P \cdot R_1 = 0 \quad (2.3)$$

Из (2.3) получим:

$$T_1 = P \quad (2.4)$$

Система уравнений сил и моментов для точки O_2 :

$$\sum F_{kx} = 0: T_2 \cdot \cos \alpha_6 + T_3 \cdot \cos \alpha_5 - S_1 \cdot \cos \alpha_2 = 0 \quad (2.5)$$

$$\sum F_{ky} = 0: S_1 \cdot \sin \alpha_2 - T_2 \cdot \sin \alpha_6 - T_3 \cdot \sin \alpha_5 = 0 \quad (2.6)$$

$$\sum M = 0: T_3 \cdot R_2 - T_2 \cdot R_2 = 0 \quad (2.7)$$

Из (2.7) получим:

$$T_2 = T_3 \quad (2.8)$$

Система уравнений сил и моментов для точки O_3 :

$$\sum F_{kx} = 0: Q - T_1 \cdot \cos \alpha_4 - T_2 \cdot \cos \alpha_6 - T_3 \cdot \cos \alpha_5 = 0 \quad (2.9)$$

$$\sum F_{ky} = 0: -G + T_1 \cdot \sin \alpha_4 + T_2 \cdot \sin \alpha_6 + T_3 \cdot \sin \alpha_5 = 0 \quad (2.10)$$

$$\sum M = 0: T_1 \cdot R_3 - T_2 \cdot R_3 = 0 \quad (2.11)$$

Из (2.11) получим:

$$T_1 = T_3 \quad (2.12)$$

С учётом (2.4) и (2.8):

$$T_1 = T_2 = T_3 = P \quad (2.13)$$

Объединив (2.1) с (2.5) и (2.2) с (2.6) с учётом (2.13), получим:

$$-S \cdot \cos \alpha_1 + P(\cos \alpha_4 + \cos \alpha_6 + \cos \alpha_5) = 0 \quad (2.14)$$

$$-P + S \cdot \sin \alpha_1 - P(\sin \alpha_4 + \sin \alpha_6 + \sin \alpha_5) = 0 \quad (2.15)$$

Перепишем (2.9) и (2.10) с учётом (2.13):

$$P \cdot (\cos \alpha_4 + \cos \alpha_6 + \cos \alpha_5) = Q \quad (2.16)$$

$$P \cdot (\sin \alpha_4 + \sin \alpha_6 + \sin \alpha_5) = G \quad (2.17)$$

Подставив (2.16) в (2.14), а (2.17) в (2.15) окончательно запишем:

$$S \cdot \cos \alpha_1 = Q \quad (2.18)$$

$$S \cdot \sin \alpha_1 = P + G \quad (2.19)$$

Из полученных выражений следует, что сила S зависит от двух составляющих. Горизонтальная составляющая определяется натяжением контактной подвески, вертикальная - весом грузов компенсатора и нагрузкой от проводов:

$$S = \sqrt{Q^2 + (P + G)^2} \quad (2.20)$$

При появлении гололёдно-изморозевых отложений вес проводов увеличивается на ΔG , что в свою очередь приведёт к изменению силы S :

$$\Delta S = \sqrt{Q^2 + (P + G + \Delta G)^2} - \sqrt{Q^2 + (P + G)^2} \quad (2.21)$$

Таким образом, по изменению силы S возможно судить об изменении веса проводов. Для рассматриваемого блочно-полиспастного компенсатора, при известных параметрах системы, достаточно установить один

тензометрический датчик в точке, где определяется усилие S . Предлагаемое место установки датчика показано на рисунке 2.8.

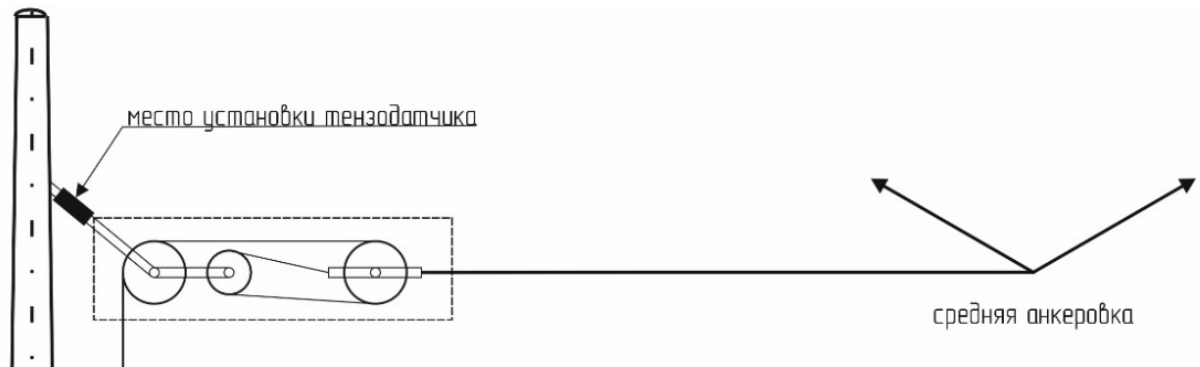


Рисунок 2.8 - Предлагаемое место установки тензометрического датчика для блочно-полиспастной системы компенсации натяжения

Следующей рассмотрим двухблочную систему компенсации натяжения. В отличие от рассмотренного выше компенсатора в данной системе канат проходит через два блока, при этом ветви каната расположены под разными углами. Поэтому при расчёте необходимо учитывать не только действующие усилия, но и положение ветвей каната. Силовая схема двухблочного компенсатора представлена на рисунке 2.9.

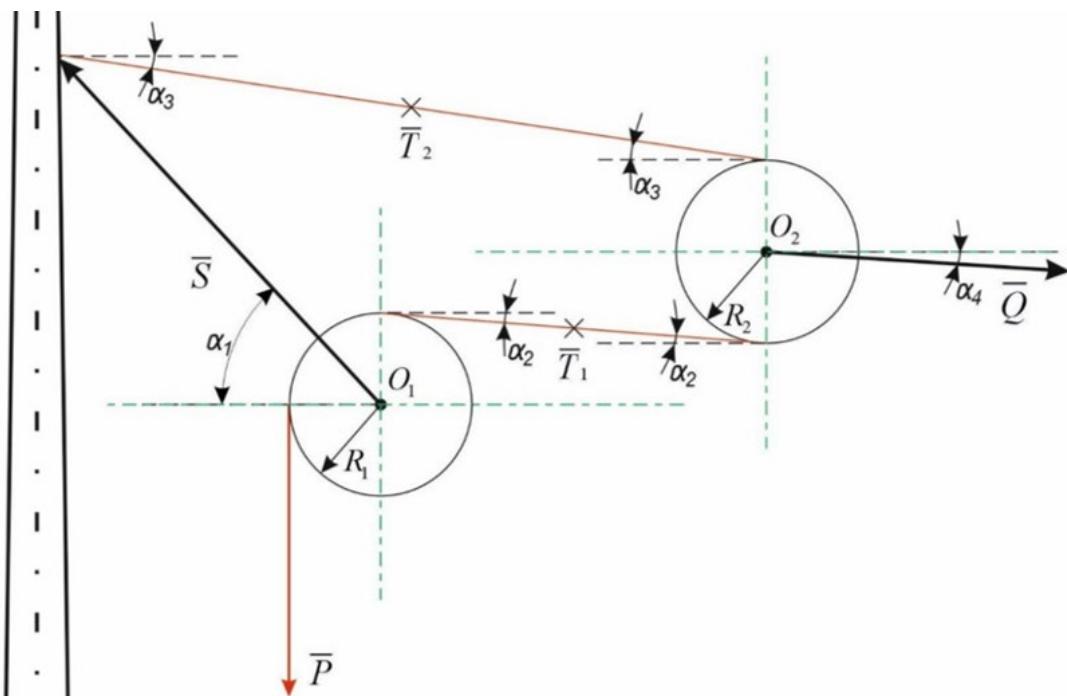


Рисунок 2.9 - Силовая схема двухблочного компенсатора

Рассмотрим первый блок. Для него запишем уравнения равновесия и определим зависимость усилия S от веса грузов P и углов положения каната.

Система уравнений сил и моментов для точки O_1 :

$$\sum F_{kx} = 0: T_1 \cdot \cos \alpha_2 - S \cdot \cos \alpha_1 = 0 \quad (2.22)$$

$$\sum F_{ky} = 0: S \cdot \sin \alpha_1 - T_1 \cdot \sin \alpha_2 - P = 0 \quad (2.23)$$

$$\sum M = 0: T_1 \cdot R_1 - P \cdot R_1 = 0 \quad (2.24)$$

Из (2.24) получим:

$$T_1 = P \quad (2.25)$$

Подставим полученное выражение в уравнения и получим:

$$P \cdot \cos \alpha_2 = S \cdot \cos \alpha_1. \quad (2.26)$$

$$S \cdot \sin \alpha_1 = P \cdot \sin \alpha_2 + P. \quad (2.27)$$

Из полученных выражений определим $\cos$ и $\sin$ угла α_2 :

$$\cos \alpha_2 = \frac{S}{P} \cos \alpha_1 \quad (2.28)$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{S \cdot \sin \alpha_1 - P}{P} \quad (2.29)$$

Подставив полученные значения в основное тригонометрическое тождество, получим:

$$\left(\frac{S}{P} \cdot \cos \alpha_1 \right)^2 + \left(\frac{S \cdot \sin \alpha_1 - P}{P} \right)^2 = 1 \quad (2.30)$$

После упрощения:

$$S^2 - 2P \cdot S \cdot \sin \alpha_1 = 0 \quad (2.31)$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{S}{2P} \quad (2.32)$$

Таким образом:

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{S}{2P}\right) \quad (2.33)$$

Аналогично из (2.28) получим:

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{S}{P} \sqrt{1 - \left(\frac{S}{2P}\right)^2}\right) \quad (2.34)$$

Далее рассмотрим второй блок.

Система уравнений сил и моментов для точки O_2 :

$$\sum F_{kx} = 0: Q \cdot \cos \alpha_4 - T_1 \cdot \cos \alpha_2 - T_2 \cdot \cos \alpha_3 = 0 \quad (2.35)$$

$$\sum F_{ky} = 0: -Q \cdot \sin \alpha_4 + T_1 \cdot \sin \alpha_2 + T_2 \cdot \sin \alpha_3 = 0 \quad (2.36)$$

$$\sum M = 0: T_1 \cdot R_2 - T_2 \cdot R_2 = 0 \quad (2.37)$$

Из полученного выражения получим:

$$T_1 = T_2 = P \quad (2.38)$$

После подстановки:

$$Q \cdot \cos \alpha_4 = P \cdot \cos \alpha_2 + P \cdot \cos \alpha_3 \quad (2.39)$$

$$Q \cdot \sin \alpha_4 = P \cdot \sin \alpha_2 + P \cdot \sin \alpha_3 \quad (2.40)$$

Угол определим через полученные зависимости.

$$Q^2 = P^2 \cdot \left[(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)^2 + (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_3)^2 \right] \quad (2.41)$$

После упрощения и применения формулы косинуса разности:

$$\cos(\alpha_2 - \alpha_3) = \frac{Q^2}{2P^2} - 1 \quad (2.42)$$

Из полученного выражения следует:

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \arccos\left(\frac{Q^2}{2P^2} - 1\right) \quad (2.43)$$

Второй угол определяется из соотношения:

$$\alpha_4 = \arccos\left(\frac{P(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)}{Q}\right) \quad (2.44)$$

В результате получены зависимости углов и сил от значений S и Q.

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{S}{2P}\right) \quad (2.45)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{S}{P} \sqrt{1 - \left(\frac{S}{2P}\right)^2}\right) \quad (2.46)$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \arccos\left(\frac{Q^2}{2P^2} - 1\right) \quad (2.47)$$

$$\alpha_4 = \arccos\left(\frac{P(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)}{Q}\right) \quad (2.48)$$

Из полученных зависимостей следует, что для двухблочного компенсатора одного значения силы S недостаточно.

Первым датчиком будем измерять усилие S со стороны контактной подвески, вторым - результирующую силу Q . Предлагаемые места установки датчиков представлены на рисунке 2.10.

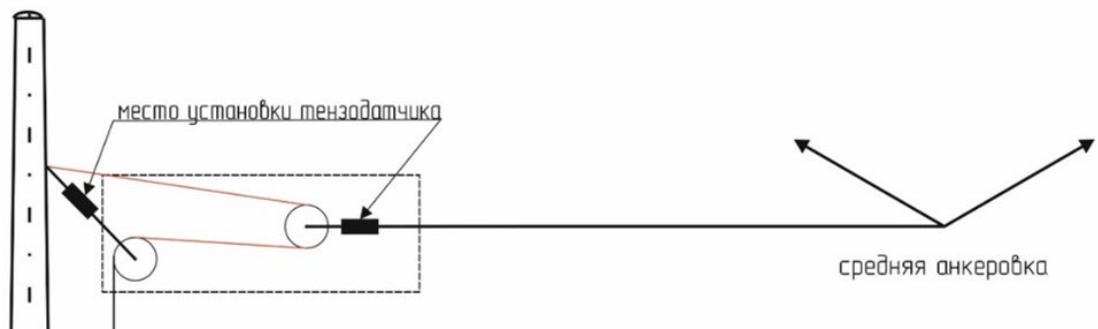


Рисунок 2.10 - Предлагаемые места установки тензометрических датчиков для двухблочной системы компенсации натяжения

Следующей рассмотрим трёхблочную систему компенсации натяжения. В данной системе канат проходит уже через три блока и имеет большее количество участков с различным направлением. При изменении нагрузки усилия будут перераспределяться между всеми ветвями каната. Силовая схема трёхблочного компенсатора представлена на рисунке 2.11.

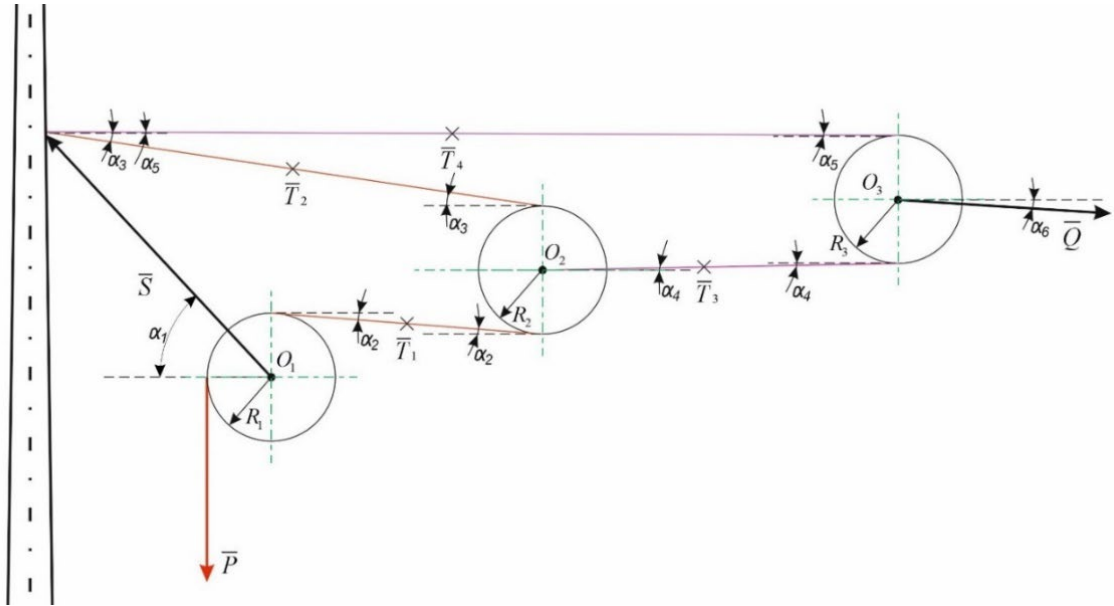


Рисунок 2.11 - Силовая схема трёхблочного компенсатора

Для определения сил и углов запишем уравнения равновесия для каждого из трёх блоков.

Система уравнений сил и моментов для точки O_1 :

$$\sum F_{kx} = 0: T_1 \cdot \cos \alpha_2 - S \cdot \cos \alpha_1 = 0 \quad (2.49)$$

$$\sum F_{ky} = 0: S \cdot \sin \alpha_1 - T_1 \cdot \sin \alpha_2 - P = 0 \quad (2.50)$$

$$\sum M = 0: T_1 \cdot R_1 - P \cdot R_1 = 0 \quad (2.51)$$

Из (2.51) получим:

$$T_1 = P \quad (2.52)$$

Подставим (2.52) в (2.49) и (2.50), получим:

$$P \cdot \cos \alpha_2 = S \cdot \cos \alpha_1 \quad (2.53)$$

$$S \cdot \sin \alpha_1 = P \cdot \sin \alpha_2 + P \quad (2.54)$$

Из (2.53) и (2.54) выражаем $\cos$ и $\sin$ угла:

$$\cos \alpha_2 = \frac{S}{P} \cos \alpha_1 \quad (2.55)$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{S \cdot \sin \alpha_1 - P}{P} \quad (2.56)$$

Подставив полученные выражения в основное тригонометрическое тождество, получим:

$$\left(\frac{S}{P} \cdot \cos \alpha_1 \right)^2 + \left(\frac{S \cdot \sin \alpha_1 - P}{P} \right)^2 = 1 \quad (2.57)$$

После упрощения:

$$S^2 - 2P \cdot S \cdot \sin \alpha_1 = 0 \quad (2.58)$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{S}{2P} \quad (2.59)$$

Таким образом:

$$\alpha_1 = \arcsin \left(\frac{S}{2P} \right) \quad (2.60)$$

Аналогично получим:

$$\alpha_2 = \arccos \left(\frac{S}{P} \sqrt{1 - \left(\frac{S}{2P} \right)^2} \right) \quad (2.61)$$

Далее рассмотрим второй блок.

Система уравнений сил и моментов для точки O_2 :

$$\sum F_{kx} = 0: T_3 \cdot \cos \alpha_4 - T_1 \cdot \cos \alpha_2 - T_2 \cdot \cos \alpha_3 = 0 \quad (2.62)$$

$$\sum F_{ky} = 0: -T_3 \cdot \sin \alpha_4 + T_1 \cdot \sin \alpha_2 + T_2 \cdot \sin \alpha_3 = 0 \quad (2.63)$$

$$\sum M = 0: T_1 \cdot R_2 - T_2 \cdot R_2 = 0 \quad (2.64)$$

Из полученного выражения получим:

$$T_1 = T_2 = P \quad (2.65)$$

Подставим (2.65) в (2.62) и (2.63):

$$T_3 \cdot \cos \alpha_4 = P \cdot \cos \alpha_2 + P \cdot \cos \alpha_3 \quad (2.66)$$

$$T_3 \cdot \sin \alpha_4 = P \cdot \sin \alpha_2 + P \cdot \sin \alpha_3 \quad (2.67)$$

Угол определяется преобразованием полученных уравнений с применением формулы косинуса разности:

$$\cos(\alpha_2 - \alpha_3) = \frac{T_3^2}{2P^2} - 1 \quad (2.68)$$

Из (2.68) получаем:

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \arccos\left(\frac{T_3^2}{2P^2} - 1\right) \quad (2.69)$$

Второй угол определяется из соотношения:

$$\alpha_4 = \arccos\left(\frac{P(\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3)}{T_3}\right) \quad (2.70)$$

Аналогично рассмотрим третий блок.

Система уравнений сил и моментов для точки O_3 :

$$\sum F_{kx} = 0: Q \cdot \cos \alpha_6 - T_4 \cdot \cos \alpha_5 - T_3 \cdot \cos \alpha_4 = 0 \quad (2.71)$$

$$\sum F_{ky} = 0: -Q \cdot \sin \alpha_6 + T_4 \cdot \sin \alpha_5 + T_3 \cdot \sin \alpha_4 = 0 \quad (2.72)$$

$$\sum M = 0: T_3 \cdot R_3 - T_4 \cdot R_3 = 0 \quad (2.73)$$

Из (2.73) получим:

$$T_3 = T_4 \quad (2.74)$$

Подставим (2.74) в (2.71) и (2.72), получим:

$$Q \cdot \cos \alpha_6 = T_3 (\cos \alpha_5 + \cos \alpha_4) \quad (2.75)$$

$$Q \cdot \sin \alpha_6 = T_3 (\sin \alpha_5 + \sin \alpha_4) \quad (2.76)$$

Угол определим с использованием формулы косинуса разности:

$$\cos(\alpha_4 - \alpha_5) = \frac{Q^2}{2T_3^2} - 1 \quad (2.77)$$

Из (2.77) получаем:

$$\alpha_5 = \alpha_4 - \arccos\left(\frac{Q^2}{2T_3^2} - 1\right) \quad (2.78)$$

Последний угол можно определить из выражения:

$$\alpha_6 = \arccos\left(\frac{T_3 (\cos \alpha_4 + \cos \alpha_5)}{Q}\right) \quad (2.79)$$

В результате получены выражения для углов и сил как функции S , Q и T_3 .

$$\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{S}{2P}\right) \quad (2.80)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{S}{P}\sqrt{1-\left(\frac{S}{2P}\right)^2}\right) \quad (2.81)$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \arccos\left(\frac{Q^2}{2P^2} - 1\right) \quad (2.82)$$

$$\alpha_4 = \arccos\left(\frac{P(\cos\alpha_2 + \cos\alpha_3)}{Q}\right) \quad (2.83)$$

$$\alpha_5 = \alpha_4 - \arccos\left(\frac{Q^2}{2T_3^2} - 1\right) \quad (2.84)$$

$$\alpha_6 = \arccos\left(\frac{T_3(\cos\alpha_4 + \cos\alpha_5)}{Q}\right) \quad (2.85)$$

Из полученных для трёхблочного компенсатора зависимостей следует, что изменение нагрузки приводит к изменению не только усилий, но и углов между отдельными ветвями каната. Поэтому, как и для двухблочной системы, одного измеряемого усилия недостаточно.

Основными измеряемыми величинами примем S и Q . Кроме них возможно контролировать усилие в одной из промежуточных ветвей, например T_4 . Предлагаемые места установки тензометрических датчиков показаны на рисунке 2.12.

Таким образом, для рассмотренных компенсаторов количество измеряемых усилий будет различаться. Для блочно-полиспастной системы достаточно измерять силу S . Для двухблочного компенсатора необходимо измерять S и Q . В трёхблочной системе кроме S и Q возможно дополнительно контролировать усилие T_4 .

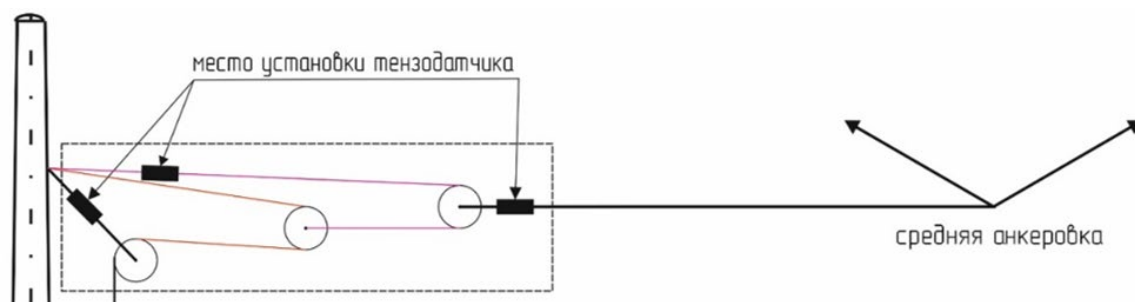


Рисунок 2.12 - Предлагаемые места установки тензометрических датчиков для трёхблочной системы компенсации натяжения

Полученные зависимости в дальнейшем будем использовать для определения изменения нагрузки ΔG по значениям усилий, измеряемым тензометрическими датчиками.

2.5 Получение практических зависимостей для расчёта приращения усилия в точке тензометрического контроля

В разделе 2.4 рассмотрены силы, действующие в выбранных точках компенсирующих устройств. Теперь определим, как будут изменяться эти силы при увеличении веса проводов на ΔG .

До появления гололёдно-изморозевых отложений усилие в точке установки датчика примем равным S_0 . При увеличении веса проводов оно изменится до значения S . Разность между новым и исходным значениями будет определять приращение ΔS , регистрируемое тензометрическим датчиком.

Величину ΔG пока будем задавать непосредственно. На данном этапе нет необходимости связывать её с определённой маркой контактного провода, толщиной отложений и длиной участка. Сначала необходимо установить, как заданная нагрузка изменяет усилие в каждом из рассматриваемых компенсаторов. Расчёт самой нагрузки для конкретных проводов будет выполнен далее с учётом их геометрических размеров [5, 6, 105].

Полученные зависимости будем рассматривать в двух направлениях. Сначала при заданной ΔG определим новое значение S и его изменение относительно S_0 . Такой расчёт показывает, насколько изменится усилие в месте установки датчика.

При работе системы известным будет уже другое значение - ΔS , полученное по показаниям тензометрического датчика. Поэтому из тех же выражений необходимо получить ΔG . В этом случае расчёт выполняется в обратном направлении.

Первой рассмотрим блочно-полиспаственную систему компенсации натяжения. Для неё сила S зависит от натяжения контактной подвески Q , веса грузов компенсатора P и нагрузки G .

$$S_0 = \sqrt{Q^2 + (P + G)^2} \quad (2.86)$$

Пусть вес проводов увеличился на ΔG . Тогда вместо нагрузки G будет действовать $G + \Delta G$ и получим

$$S = \sqrt{Q^2 + (P + G + \Delta G)^2} \quad (2.87)$$

Изменение силы относительно начального состояния составит

$$\Delta S = \sqrt{Q^2 + (P + G + \Delta G)^2} - \sqrt{Q^2 + (P + G)^2} \quad (2.88)$$

Из этого же выражения определим дополнительную нагрузку по измеренному значению ΔS

$$\Delta G = \sqrt{(S_0 + \Delta S)^2 - Q^2} - (P + G) \quad (2.89)$$

Для блочно-полиспастного компенсатора этого достаточно. При известных P , Q и G изменение веса проводов определяется по изменению одной силы S в выбранной точке.

Далее рассмотрим двухблочный компенсатор. Для него воспользуемся уравнениями равновесия двух блоков, полученными ранее. Трением в блоках пренебрегаем, канаты считаем невесомыми и нерастяжимыми.

$$G + \Delta G \leq 2P \quad (2.90)$$

После преобразования получим значение силы S при действии дополнительной нагрузки ΔG

$$S = \sqrt{2P^2 + P(G + \Delta G)} \quad (2.91)$$

До появления дополнительной нагрузки $\Delta G = 0$, поэтому исходное усилие равно

$$S_0 = \sqrt{2P^2 + PG} \quad (2.92)$$

Приращение силы определим как разность текущего и исходного значений

$$\Delta S = \sqrt{2P^2 + P(G + \Delta G)} - \sqrt{2P^2 + PG} \quad (2.93)$$

Отсюда получим дополнительную нагрузку

$$\Delta G = \frac{\Delta S^2}{P} + 2\Delta S \sqrt{2 + \frac{G}{P}} \quad (2.94)$$

Для двухблочного компенсатора изменение ΔG также приводит к изменению силы S , но в полученное выражение входят P и G . Кроме этого, необходимо учитывать положение равновесия блоков, для которого была получена данная зависимость.

При значительном увеличении вертикальной нагрузки принятое положение системы может измениться. В этом случае использовать полученное выражение для прежнего положения блоков уже нельзя.

Следующей рассмотрим трёхблочную систему компенсации натяжения. Здесь канат проходит через три блока, а изменение нагрузки сопровождается изменением усилий сразу в нескольких его ветвях. Условия для блоков и канатов примем такими же, как и для рассмотренных выше схем.

Для действующей суммарной нагрузки должно выполняться условие

$$G + \Delta G \leq 4P \quad (2.95)$$

Используя зависимости, полученные в разделе 2.4, после преобразования определим силу S

$$S = \sqrt{2P^2 + \frac{P}{2}(G + \Delta G)} \quad (2.96)$$

При $\Delta G = 0$ она будет равна

$$S_0 = \sqrt{2P^2 + \frac{PG}{2}} \quad (2.97)$$

Тогда приращение силы составит

$$\Delta S = \sqrt{2P^2 + \frac{P}{2}(G + \Delta G)} - \sqrt{2P^2 + \frac{PG}{2}} \quad (2.98)$$

Из полученного выражения определим ΔG

$$\Delta G = \frac{2\Delta S^2}{P} + 4\Delta S \sqrt{2 + \frac{G}{2P}} \quad (2.99)$$

При одинаковом значении ΔG изменение силы S в трёхблочной системе получается меньше, чем в двухблочной. Поэтому при выборе тензометрического датчика для данной схемы необходимо учитывать меньшее изменение контролируемого усилия.

При работе АСКВП тип компенсирующего устройства будет известен заранее. Поэтому каждый раз выполнять полный расчёт силовой схемы, приведённый в разделе 2.4, не требуется. Достаточно использовать соответствующую зависимость для данного компенсатора. Полученные выше выражения сведём в таблицу 2.1. Выбор нужного выражения выполняется по типу компенсирующего устройства, установленного на контролируемом участке [33, 55–57].

Во всех трёх случаях исходной величиной остаётся дополнительная нагрузка ΔG , а контролируемой - изменение силы S . Но одинакового выражения для рассмотренных систем получить нельзя. Передача усилия в них различается, поэтому при одном и том же увеличении веса проводов значения ΔS также будут различаться.

Для блочно-полиспастного компенсатора связь между ΔG и S получается наиболее простой. В двухблочной системе при расчёте необходимо дополнительно учитывать условие, при котором сохраняется принятое положение блоков. Для трёхблочного компенсатора изменение силы S при той же нагрузке ΔG получается меньше. Следовательно, различаться будут не только расчётные выражения, но и величина изменения усилия, регистрируемого датчиком.

Таблица 2.1 - 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	$S = \sqrt{2P^2 + \frac{P}{2}(G + \Delta G)}$	$\Delta G = \frac{2\Delta S^2}{P} + 4\Delta S \sqrt{2 + \frac{G}{2P}}$

Полученные зависимости далее будем использовать при расчёте дополнительной нагрузки уже для конкретных контактных проводов. Для этого необходимо задать размеры провода, длину рассматриваемого участка и параметры гололёдно-изморозевых отложений. После определения ΔG по соответствующей зависимости можно получить ожидаемое изменение силы в точке тензометрического контроля.

2.6 Сравнительная оценка расчётной чувствительности тензометрического контроля для различных типов компенсирующих устройств

Полученные выше зависимости показывают, что одно и то же увеличение веса проводов будет по-разному изменять усилия в рассматриваемых компенсаторах. Поэтому перед дальнейшим расчётом необходимо сравнить выбранные точки установки тензометрических датчиков.

Положим дополнительную нагрузку ΔG одинаковой для всех трёх систем. В этом случае будем сравнивать изменение силы ΔS . Чем больше

изменяется сила при одной и той же ΔG , тем заметнее будет изменение показаний датчика. При небольшом ΔS на результат измерения в большей степени могут влиять трение в блоках, температура и различные кратковременные воздействия [16, 19, 71, 72, 90, 94-96].

Сначала рассмотрим блочно-полиспастный компенсатор. Для него при увеличении нагрузки изменяется результирующая сила S в выбранной ранее точке крепления блока. Других усилий для определения ΔG в полученной зависимости не требуется. Поэтому в данной системе изменение веса проводов можно определять по показаниям одного тензометрического датчика.

В двухблочной системе нагрузка передаётся несколько иначе. При её изменении меняются усилия в ветвях каната и их положение. Поэтому ранее для этой системы кроме S было принято измерять силу Q . Значение S используется при определении изменения нагрузки, а измерение Q необходимо для учёта сил, действующих во второй части компенсатора.

Для трёхблочной системы передача нагрузки происходит уже через три блока. При одинаковом значении ΔG изменение силы S здесь получается меньше, чем для двухблочной системы. Основными измеряемыми усилиями остаются S и Q , кроме них при необходимости можно контролировать T_4 .

Результаты сравнения приведены в таблице 2.2.

Как видно из таблицы 2.2, для блочно-полиспастного компенсатора достаточно одного измеряемого усилия S . Для двухблочного компенсатора рассматриваются S и Q . В трёхблочной системе при необходимости к ним добавляется T_4 . При этом для последней схемы изменение силы S при той же дополнительной нагрузке получается меньше.

До настоящего момента ΔG задавалась как известная величина. При расчёте для реального участка необходимо определить её уже для конкретного провода и длины участка. После этого по полученным зависимостям можно найти изменение силы, которое должен зарегистрировать датчик.

Таблица 2.2 - Сравнительная характеристика расчётной чувствительности тензометрического контроля для различных типов компенсирующих устройств

Тип компенсирующего устройства	Основной контролируемый параметр	Особенности расчётного отклика	Измерительная интерпретация
Блочно-полиспастная система	S	Дополнительная нагрузка непосредственно отражается на результирующем усилии в точке контроля	Наиболее простая схема интерпретации; достаточно одного основного измерительного канала
Двухблочная система	S, Q	Отклик зависит от усилия и углового положения ветвей каната	Требуется учёт дополнительного силового параметра Q для повышения определённости расчёта
Трёхблочная система	S, Q, при необходимости T_4	Отклик менее выражен; влияние геометрии ветвей наиболее существенно	Желательно расширение состава измеряемых параметров и более строгая калибровка

Рассмотрим такой расчёт для блочно-полиспастного компенсатора. В качестве исходных примем контактные провода МФ-85, МФ-100, МФ-120 и МФ-150. Для каждого провода определим изменение ΔS при увеличении массы гололёдных отложений. Полученные результаты представлены на рисунке 2.13.

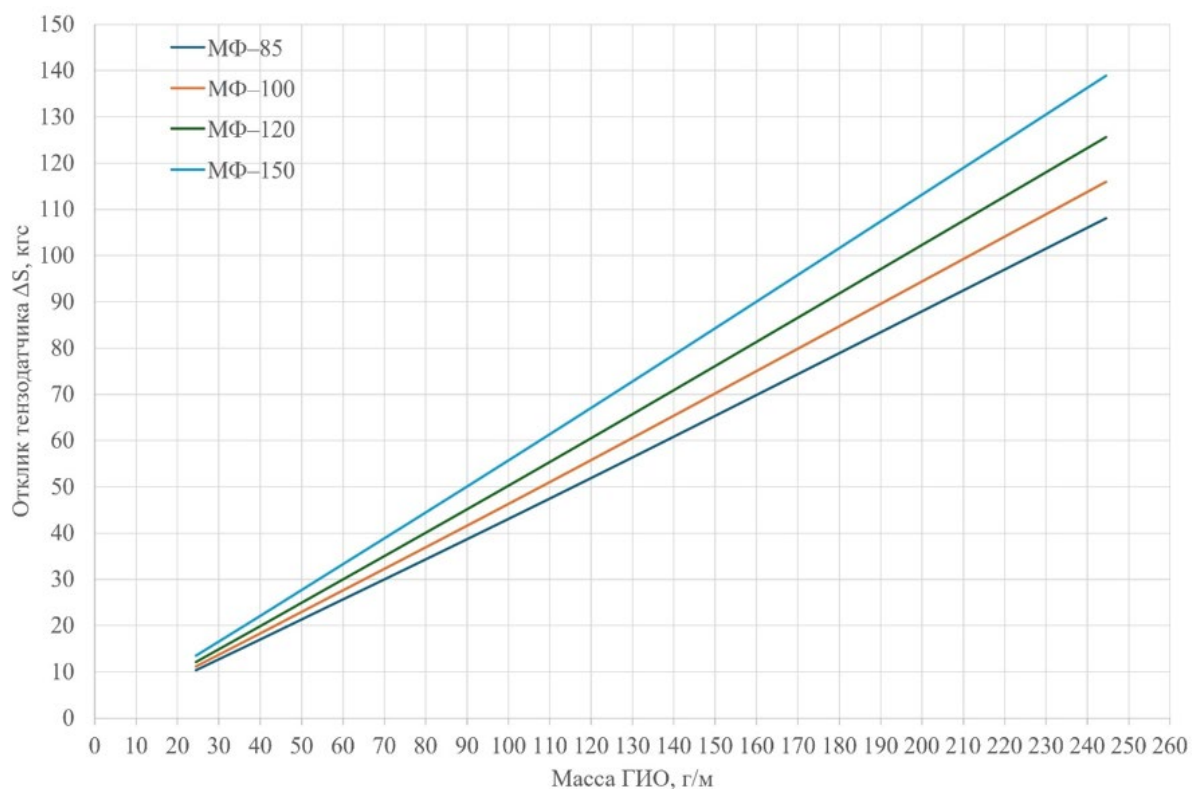


Рисунок 2.13 - Номограмма расчётного изменения показаний тензометрического датчика при увеличении массы гололёдных отложений для блочно-полиспастной системы компенсации натяжения

По оси абсцисс на рисунке 2.13 отложена масса гололёдных отложений на единицу длины провода, по оси ординат - приращение силы ΔS . Отдельные зависимости получены для проводов МФ-85, МФ-100, МФ-120 и МФ-150.

При увеличении массы отложений значение ΔS возрастает. При этом для рассматриваемых проводов получены разные значения изменения силы. Следовательно, диапазон ожидаемых показаний датчика необходимо определять с учётом типа установленного контактного провода.

По приведённым зависимостям можно определить, какое приращение силы соответствует заданной дополнительной массе отложений. Это значение может быть использовано при выборе тензометрического датчика и его диапазона измерения.

Необходимо учитывать, что во время эксплуатации изменение силы может быть вызвано не только увеличением веса проводов. На показания будут

влиять ветер, колебания контактной подвески, осадки, а также состояние блоков и канатов компенсирующего устройства. Поэтому при дальнейшем использовании ΔS в АСКВП необходимо учитывать условия, при которых произошло изменение измеряемой силы.

Таким образом, для каждого типа компенсатора необходимо использовать полученные для него зависимости и соответствующий состав измеряемых усилий. После задания параметров конкретного провода и дополнительной нагрузки можно определить ожидаемое изменение показаний тензометрического датчика.

2.7 Выводы по главе

Во второй главе рассмотрен сам принцип тензометрического контроля изменения веса проводов и тросов контактной подвески. В качестве измеряемого параметра принято изменение усилия ΔS в выбранной точке компенсирующего устройства. При появлении гололёдно-изморозевых отложений вес проводов увеличивается, нагрузка передаётся на элементы компенсатора и, соответственно, изменяется усилие, которое может быть зарегистрировано тензометрическим датчиком.

Отдельно рассмотрен вопрос, где именно такой датчик можно установить. Для некомпенсированной и полукompенсированной подвески возможны свои варианты установки, однако для полностью компенсированной подвески более подходящим является размещение датчика непосредственно в компенсирующем устройстве. В этом случае не требуется устанавливать дополнительное оборудование на рабочей части контактного провода, а сам датчик находится в точке, где изменение нагрузки всё равно проявляется через изменение силы.

Далее были рассмотрены три типа компенсирующих устройств: блочно-полиспастное, двухблочное и трёхблочное. Для каждого из них составлена своя расчётная схема. Полученные зависимости позволяют определить, как дополнительная нагрузка ΔG изменяет усилие в выбранной точке, и решить обратную задачу - по изменению измеряемой силы определить дополнительный вес проводов.

Следует учитывать, что одинаковое увеличение веса проводов для разных компенсаторов не даст одинакового изменения усилия. В блочно-полиспастной системе для расчёта достаточно контролировать силу S . В двухблочной системе в расчёте появляется также усилие Q . Для трёхблочной системы схема передачи усилий ещё сложнее и для её описания может потребоваться дополнительное измерение промежуточного усилия.

Итак, во второй главе получены зависимости, связывающие увеличение веса проводов от гололёдно-изморозевых отложений с изменением усилий в компенсирующих устройствах. Эти зависимости в дальнейшем могут быть использованы в АСКВП для обработки показаний тензометрических датчиков и определения дополнительной нагрузки на контактную подвеску.

3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЕСА ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

3.1 Постановка вопроса

Во второй главе была определена связь между увеличением веса проводов от гололёдно-изморозевых отложений и изменением усилия в элементах компенсирующего устройства. Полученные зависимости позволяют по изменению силы ΔS определить дополнительную нагрузку ΔG .

Теперь необходимо рассмотреть, каким образом практически получить это значение силы и передать его для дальнейшего расчёта. Для этого одного тензометрического датчика недостаточно. Необходимо обеспечить его питание, получить и обработать сигнал, определить начальное значение усилия S_0 и организовать передачу полученных данных.

Все перечисленные элементы предлагается объединить в АСКВП. В данном случае система будет состоять из измерительной и расчётной частей. Первая отвечает за получение сигнала от тензометрического датчика и его первичную обработку, вторая - за определение дополнительной нагрузки с использованием зависимостей, полученных во второй главе. Подобный переход от отдельных измерений к постоянному контролю параметров контактной сети рассматривается в работах [1, 2, 14–16, 90].

Использование такой системы в первую очередь представляет интерес для малоделятельных участков. При небольшом количестве проходящих поездов информация о начале гололёдообразования от локомотивных бригад может поступить с задержкой. Постоянно установленный датчик позволяет контролировать изменение нагрузки независимо от движения поездов на участке.

При этом сама АСКВП не должна определять необходимость проведения противогололёдных мероприятий. Её задача заключается в том, чтобы зафиксировать изменение веса проводов и передать эту информацию эксплуатационному персоналу.

Общая структура АСКВП и порядок её взаимодействия с эксплуатационными подразделениями представлены на рисунке 3.1.

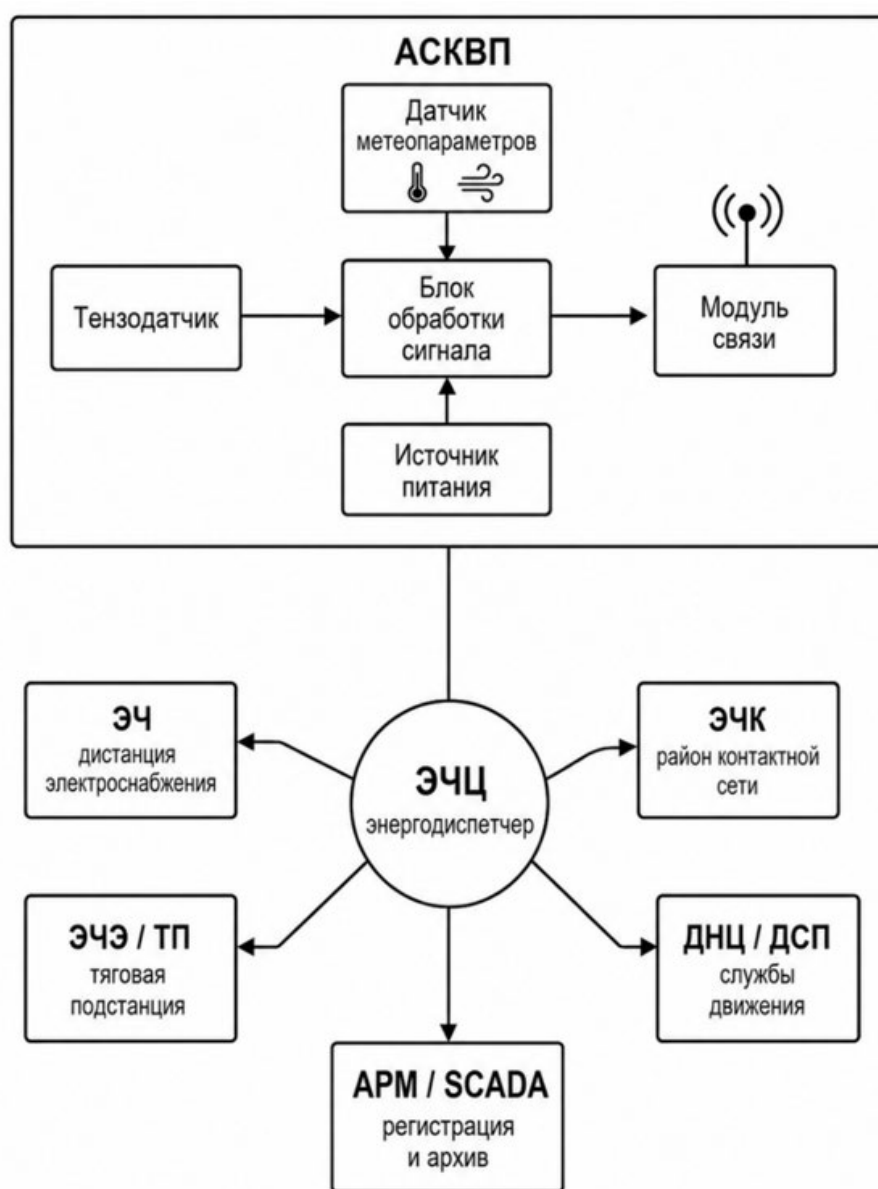


Рисунок 3.1 - Общая структурная схема АСКВП и её взаимодействия с эксплуатационными подразделениями

3.2 Состав измерительного комплекса для тензометрического контроля веса проводов контактной подвески

Для реализации тензометрического контроля недостаточно установить в выбранной точке только датчик усилия. Получаемый от него сигнал необходимо преобразовать, передать и далее использовать при расчёте изменения веса проводов. Поэтому тензометрический датчик будем рассматривать как один из элементов измерительного комплекса АСКВП.

Рассмотрим основные элементы такого комплекса. В его состав необходимо включить тензометрический датчик с узлом крепления, устройство преобразования сигнала, источник питания и средство передачи полученных данных. Для последующей работы с измеренной величиной также необходим программный блок.

Место установки датчика и его механическое крепление должны обеспечивать передачу на чувствительный элемент усилия S . При изменении нагрузки на контактную подвеску изменяется и усилие в выбранной точке компенсирующего устройства. Тензометрический датчик регистрирует это изменение и преобразует его в электрический сигнал.

Следует учитывать, что оборудование будет размещаться непосредственно на контактной сети и работать в условиях воздействия температуры, ветра и атмосферных осадков. При этом установка измерительного комплекса не должна изменять работу компенсирующего устройства и создавать дополнительные ограничения для эксплуатации контактной подвески [3, 4, 36].

Полученный от тензометрического датчика сигнал необходимо подготовить для дальнейшей передачи. Для этого в измерительном комплексе предусматривается устройство первичного преобразования, выполняющее усиление и преобразование сигнала в цифровой вид. После этого результат измерения может быть передан в систему обработки данных.

Особое значение возможность такой передачи имеет для малодеятельных участков, где постоянное присутствие обслуживающего персонала не предусматривается. В связи с этим работа измерительного комплекса должна быть автономной. Для его питания необходимо предусмотреть отдельный источник энергии, а для передачи результатов измерений - соответствующий модуль связи [14, 15]. Общий состав предлагаемого измерительного комплекса представлен на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 - Состав измерительного комплекса АСКВП для тензометрического контроля веса проводов контактной подвески

После получения измерительной информации определим текущее значение силы S . Это значение сравнивается с базовым S_0 , которое соответствует состоянию контактной подвески без дополнительной нагрузки от гололёдно-изморозевых отложений. Разность между этими значениями определяет приращение усилия ΔS .

Само значение ΔS ещё не определяет дополнительную нагрузку на провода. Для расчёта ΔG необходимо учитывать тип компенсирующего устройства и использовать зависимости, полученные ранее в главе 2.

Таким образом, измерительный комплекс АСКВП обеспечивает получение значения силы в выбранной точке компенсатора и передачу этого значения для дальнейшего расчёта. Определение дополнительной нагрузки

выполняется уже после обработки измеренного приращения усилия с учётом принятой расчётной модели.

3.3 Измерительный канал тензометрического контроля

Для дальнейшего использования тензометрического контроля необходимо определить, каким образом показания датчика будут преобразовываться в информацию о состоянии контактной подвески. Само по себе измерение усилия S в выбранной точке компенсирующего устройства такой информации ещё не даёт. Полученное значение необходимо сравнить с исходным, определить величину его изменения и только после этого перейти к расчёту дополнительной нагрузки от ГИО.

В состав АСКВП кроме тензометрического датчика должны входить устройства преобразования и обработки сигнала, средства передачи данных и расчётная часть системы. Тензодатчик в данном случае является только первичным измерительным элементом. Его задача заключается в регистрации усилия S , изменяющегося при увеличении веса проводов и тросов контактной подвески.

После преобразования сигнала в цифровой вид текущее значение S сравнивается с базовым значением S_0 , полученным для этого же компенсирующего устройства при отсутствии дополнительной нагрузки. По разности этих значений определяется ΔS . Далее необходимо использовать расчётную модель соответствующего компенсатора, так как, как было показано во второй главе, одной и той же величине ΔS для разных схем компенсации могут соответствовать различные значения ΔG .

Для блочно-полиспастного, двухблочного и трёхблочного компенсаторов расчёт соответственно должен выполняться по полученным ранее зависимостям. Поэтому тип компенсирующего устройства является одним из исходных параметров АСКВП и должен быть известен до начала расчёта.

Обобщённая структура АСКВП в составе анкерного участка контактной сети приведена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 - Обобщённая структура АСКВП в составе анкерного участка контактной сети

Из представленной схемы видно, что измерение усилия и определение дополнительного веса проводов являются разными частями одной системы. Ошибка при задании исходного значения S_0 , выборе типа компенсатора или обработке сигнала соответственно приведёт к ошибке уже при определении ΔG .

По этой причине для каждого места установки датчика необходимо иметь исходные сведения о контролируемом узле. В первую очередь это тип компенсирующего устройства и точка установки датчика, кроме этого, необходимо хранить значение S_0 и параметры, используемые в расчёте. В дальнейшем эти данные предлагается объединить в паспорт контролируемого узла.

На эксплуатационный уровень при этом должны передаваться уже результаты расчёта, а не только текущие показания тензометрического датчика. Полученная величина дополнительной нагрузки и её изменение во времени могут использоваться как дополнительная информация при наблюдении за развитием гололёдоопасной ситуации на участке контактной сети.

3.4 Предлагаемый алгоритм регистрации и первичной обработки показаний тензометрического датчика

Когда мы определились с составом измерительного комплекса и общей структурой АСКВП, необходимо задать порядок работы с сигналом от тензодатчика. На этом этапе важно понимать: наша задача - не считать нагрузку от гололёда напрямую, а получить достоверное значение усилия S , привязать его к базовому уровню S_0 и подготовить приращение ΔS , с которым уже будет работать расчётное ядро.

Следует отметить, что сигнал с датчика в реальных условиях эксплуатации далёк от идеала. На него влияют кратковременные колебания проводов, порывы ветра, вибрации от компенсирующих устройств, электрические помехи и случайные выбросы самой измерительной аппаратуры. Брать "сырой" отсчёт без обработки и сразу пытаться делать выводы - верный путь к ложным срабатываниям, а это в нашем деле ни к чему.

Исходя из этого, алгоритм первичной обработки строится следующим образом. Сначала принимается цифровой отсчёт от измерительного канала. На этом этапе проверяется его техническая достоверность: есть ли вообще связь с датчиком, не вышел ли сигнал за пределы рабочего диапазона, нет ли обрыва или насыщения канала, не нарушена ли последовательность данных. Если отсчёт признаётся недостоверным - он отбрасывается, и вместо тревожного сообщения фиксируется служебная запись о неисправности измерительного узла.

Такое разделение принципиально: сбой в работе канала не должен «маскироваться» под гололёд, и наоборот - реальное изменение нагрузки не должно списываться на неисправность, хотя на практике такое случается, если алгоритм не продуман заранее. Общая последовательность работы алгоритма приведена на рисунке 3.4.

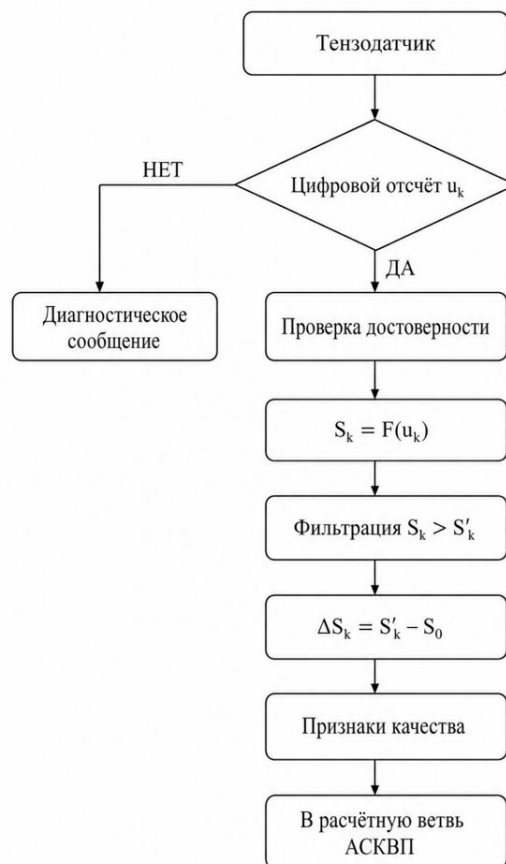


Рисунок 3.4 - Алгоритм регистрации и первичной обработки показаний тензометрического датчика АСКВП

После проверки достоверности сигнал фильтруется - убираются кратковременные возмущения, которые не связаны с устойчивым изменением нагрузки. Далее выполняется пересчёт в значение усилия S , сравнение с базовым уровнем S_0 и проверка того, насколько стабильно выявленное отклонение. Только после прохождения всех этих этапов ΔS может считаться входным параметром для расчётного ядра. Для наглядности результат фильтрации показан на рисунке 3.5.

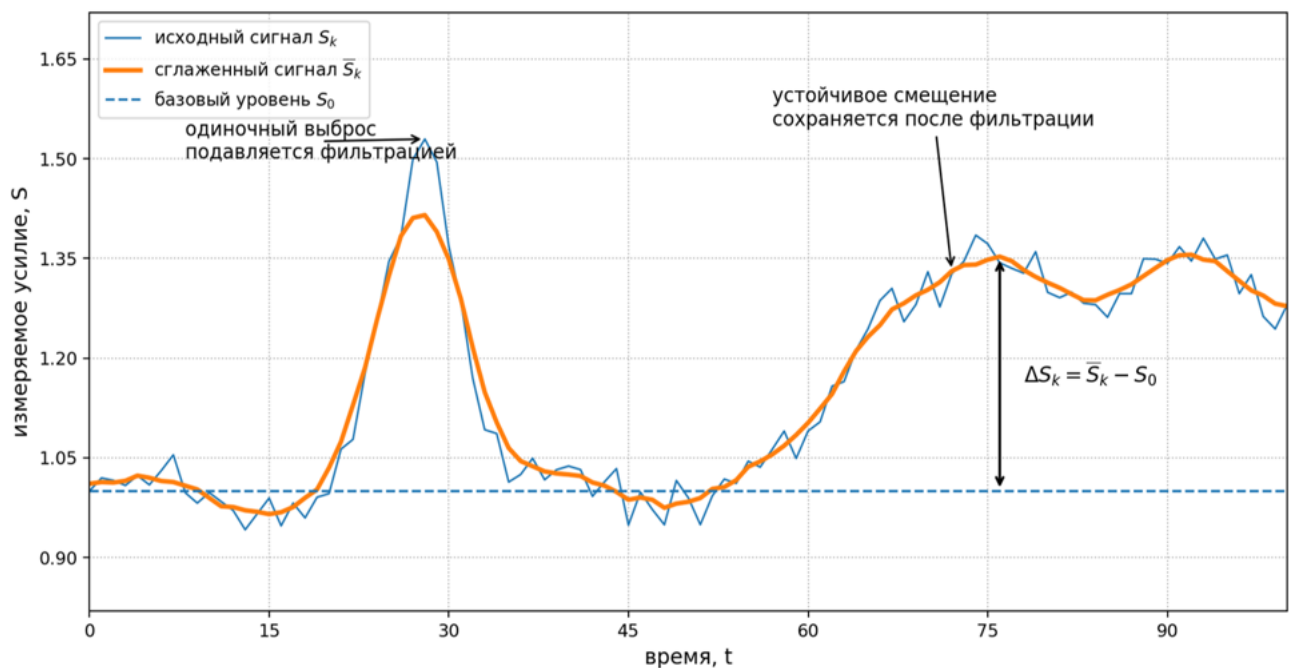


Рисунок 3.5 - Характерные варианты изменения измерительного сигнала при первичной обработке данных АСКВП

3.5 Предлагаемый алгоритм калибровки и контроля достоверности измерений

После установки тензометрического датчика на компенсирующее устройство его показания уже имеют некоторое начальное значение. Рассматривать его как абсолютный "ноль" нельзя, поскольку датчик включён в

реальную механическую систему и с момента установки воспринимает усилие, существующее в выбранной точке. Для дальнейшего контроля важно другое - знать, каким было это усилие при нормальном состоянии контактной подвески, а затем отслеживать его изменение.

На разных анкерных участках это исходное значение будет отличаться. Даже если используются одинаковые датчики и один тип компенсирующего устройства, полностью одинаковых условий установки получить практически невозможно. Где-то отличается положение грузов, где-то состояние каната или блоков, своё влияние оказывает трение. Имеют значение крепление самого датчика и то, через какие элементы передаётся на него усилие. Поэтому сравнивать показания двух узлов напрямую, без предварительной настройки каждого из них, неправильно.

Для каждого установленного датчика необходимо сначала зафиксировать его нормальный рабочий уровень. В дальнейшем это значение принимается за S_0 . Тогда интерес представляет уже не абсолютное показание датчика само по себе, а его изменение относительно ранее зафиксированного состояния. Такой подход удобен ещё и потому, что часть постоянных отличий конкретного узла фактически учитывается во время начальной настройки и не требует отдельного расчёта.

Но одного значения S_0 недостаточно. Если через некоторое время на компенсаторе выполнялась регулировка, менялся датчик, ремонтировались блоки или изменялось крепление, прежний уровень может потерять смысл. Поэтому вместе с результатом калибровки необходимо сохранять сведения о самом измерительном узле и выполненных на нём работах. Для этого в составе АСКВП предусматривается паспорт калибровки.

После монтажа датчика его первое показание ещё нельзя принимать за S_0 . Сначала нужно понять, что именно воспринимает чувствительный элемент в выбранном месте установки. Если датчик закреплён неудачно, он может реагировать в основном на местную деформацию кронштейна, вставки или другой детали, хотя с самим компенсатором в этот момент ничего не

происходит. Поэтому перед калибровкой проверяется не только наличие сигнала, но и сама механическая связь датчика с узлом. Одновременно становится видно, нормально ли работает измерительный канал: нет ли насыщения, резких скачков, проблем с питанием и других признаков неисправности.

Таблица 3.1 - Минимальный состав паспорта калибровки измерительного узла АСКВП

Параметр	Содержание	Использование в алгоритме
S_0	Базовое усилие данного измерительного узла	Уровень отсчёта для определения ΔS
Тип компенсирующего устройства	Блочно-полиспастная, двухблочная или трёхблочная схема	Выбор расчётной ветви
Параметры измерительного канала	Нулевая отметка, коэффициент пересчёта, рабочий диапазон, признаки исправности	Корректный переход от сигнала датчика к усилию S
Место установки датчика	Контролируемый узел, схема крепления, особенности механического сопряжения	Проверка соответствия расчётной модели
Режим и история работ	Обычный, зимний, сервисный режим; замена датчика, регулировка, ремонт	Правила обновления S_0 и основание для повторной калибровки

Когда с установкой всё в порядке, можно переходить к определению исходного уровня. Один отсчёт здесь мало что даёт, поскольку даже при нормальной работе показания немного изменяются. Гораздо полезнее посмотреть, как ведёт себя S в течение некоторого времени. Если значения держатся примерно на одном уровне, компенсирующее устройство исправно и признаков дополнительной нагрузки нет, этот участок сигнала можно использовать для задания S_0 . То есть за базу принимается не случайное число, а фактическое состояние узла, которое наблюдалось некоторое время и не показывало роста нагрузки.

Перед зимним периодом возникает другая проблема. Самое простое решение - заново принять текущее показание за ноль, но именно этого делать без проверки нельзя. За время эксплуатации состояние узла действительно могло измениться, однако вместе с этим уже мог начаться и рост нагрузки на проводах. Если такое увеличение попадёт в новое базовое значение, система фактически «забудет» его часть.

Особенно это важно для случая медленного нарастания ГИО, когда S увеличивается постепенно и без резкого скачка. При автоматическом обновлении S_0 часть этого роста будет принята за нормальное состояние, а дальнейшая величина ΔS окажется меньше реального изменения нагрузки. Поэтому перед зимней эксплуатацией оценивается не только само значение S , но и то, как оно менялось в последние измерения.

Если сигнал устойчив и заметного роста нет, для зимнего периода можно сохранить уточнённый уровень $S_{0\text{зим}}$. Исходное S_0 при этом остаётся в паспорте узла.

Если же показания начали расти, стали заметно сильнее разбросаны или появились признаки неисправности измерительного канала, менять базовый уровень нельзя. Сначала требуется разобраться, чем вызвано это изменение, иначе АСКВП может принять начало гололёдообразования за обычное смещение рабочей точки.



Рисунок 3.6 - Алгоритм калибровки измерительного узла и задания базового уровня S_0 в АСКВП

Повторная калибровка необходима после любого вмешательства, которое может изменить передачу усилия к датчику. К таким случаям можно отнести замену датчика, регулировку компенсирующего устройства, любые работы с блоками и канатами, изменение крепления, ремонт элементов, а также очистку или смазку подвижных частей – даже такое вмешательство может привести к смещению измерительного сигнала.

После завершения работ новое устойчивое значение (S) сравнивается с прежним базовым уровнем (S_0). Если смещение объясняется именно той

операцией, которую выполняли, и сигнал при этом стабилен - формируется новая запись в паспорте измерительного узла. А вот если разброс повышен или характер изменения не соответствует тому, что делали, система должна выдать служебное диагностическое сообщение, не выполняя автоматического обновления базового уровня.



Рисунок 3.7 – Алгоритм проверки допустимости обновления базового уровня S_0

Особенно нежелательной является ситуация, при которой происходит ошибочное автоматическое обновление (S_0) в тот момент, когда нагрузка реально растёт. В этом случае медленное увеличение усилия, вызванное началом гололёдообразования, может быть частично скрыто процедурой обновления базового уровня, и система просто не заметит проблему. Поэтому

менять (S_0) допускается только при начальной настройке, сезонной проверке, после подтверждённых регламентных работ или по решению ответственного персонала. Автоматическое обновление S_0 в данном режиме недопустимо.

Запрет на обновление должен срабатывать при положительном тренде (S), большом разбросе отсчётов, выходе сигнала за допустимые границы, потере связи с датчиком, нестабильном питании или если на узле проводились незафиксированные работы. Во всех этих случаях система, сохраняет прежнее значение (S_0) и выдаёт сообщение: «нужна проверка измерительного узла или контролируемого участка».

Следует отметить, что калибровочные процедуры в конечном счёте обеспечивают привязку АСКВП к реальному объекту контроля. Они задают базовое состояние, защищают его от ошибочного обновления, учитывают тип компенсирующего устройства и подготавливают достоверные данные для расчётного ядра. Без этой привязки вся остальная работа системы теряет смысл - можно получить расчётное значение, не соответствующее фактическому состоянию объекта.

3.6 Принцип работы расчётного ядра автоматизированной системы контроля веса проводов

Расчётное ядро АСКВП предназначено для того, чтобы перейти от измеренного приращения усилия ΔS к оценке дополнительной нагрузки ΔG , которая действует на провода и тросы контактной подвески. Важно понимать: в отличие от измерительного канала и алгоритмов первичной обработки, расчётное ядро не работает с необработанным сигналом датчика. На его вход должны поступать уже проверенные и отфильтрованные данные - такие, для которых установлено, что изменение усилия устойчиво и может

рассматриваться как диагностически значимый признак. Если пустить в расчёт неподготовленный сигнал, результат будет недостоверным, и вся затея теряет смысл.

Исходными данными для расчётного ядра служат текущее значение усилия S , базовый уровень S_0 , приращение ΔS , тип компенсирующего устройства и параметры расчётной модели. К таким параметрам относятся характеристики компенсатора, масса грузов, расчётное натяжение, марка провода или троса, длина контролируемого участка и сведения из паспорта измерительного узла. Без этих данных никуда: одинаковое приращение ΔS для разных схем компенсации может соответствовать совершенно разной дополнительной нагрузке ΔG , и угадать это без паспортных данных не получится (Рисунок 3.8).

Главная особенность расчётного ядра - выбор расчётной ветви в зависимости от типа компенсирующего устройства. Если на участке стоит блочно-полиспастная система компенсации - расчёт ведётся по одной зависимости. Для двухблочной и трёхблочной систем применяются свои зависимости, учитывающие иной характер передачи усилия от контактной подвески к точке измерения. Это исключает ситуации, когда под одну схему пытаются подогнать результаты, полученные для другой, - на практике такое, к сожалению, встречается.

Следует учитывать, что результат работы расчётного ядра имеет оценочный характер. АСКВП не должна выдавать категорическое утверждение "гололёд есть" только по одному расчётному значению ΔG . Полученная оценка должна использоваться вместе с устойчивостью изменения ΔS во времени, метеорологическими данными, состоянием измерительного канала и заданными эксплуатационными порогами. Только совокупность этих факторов позволяет сделать обоснованный вывод. Такой подход соответствует назначению системы как средства раннего выявления признаков опасного изменения нагрузки, а не фиксатора уже свершившегося факта.

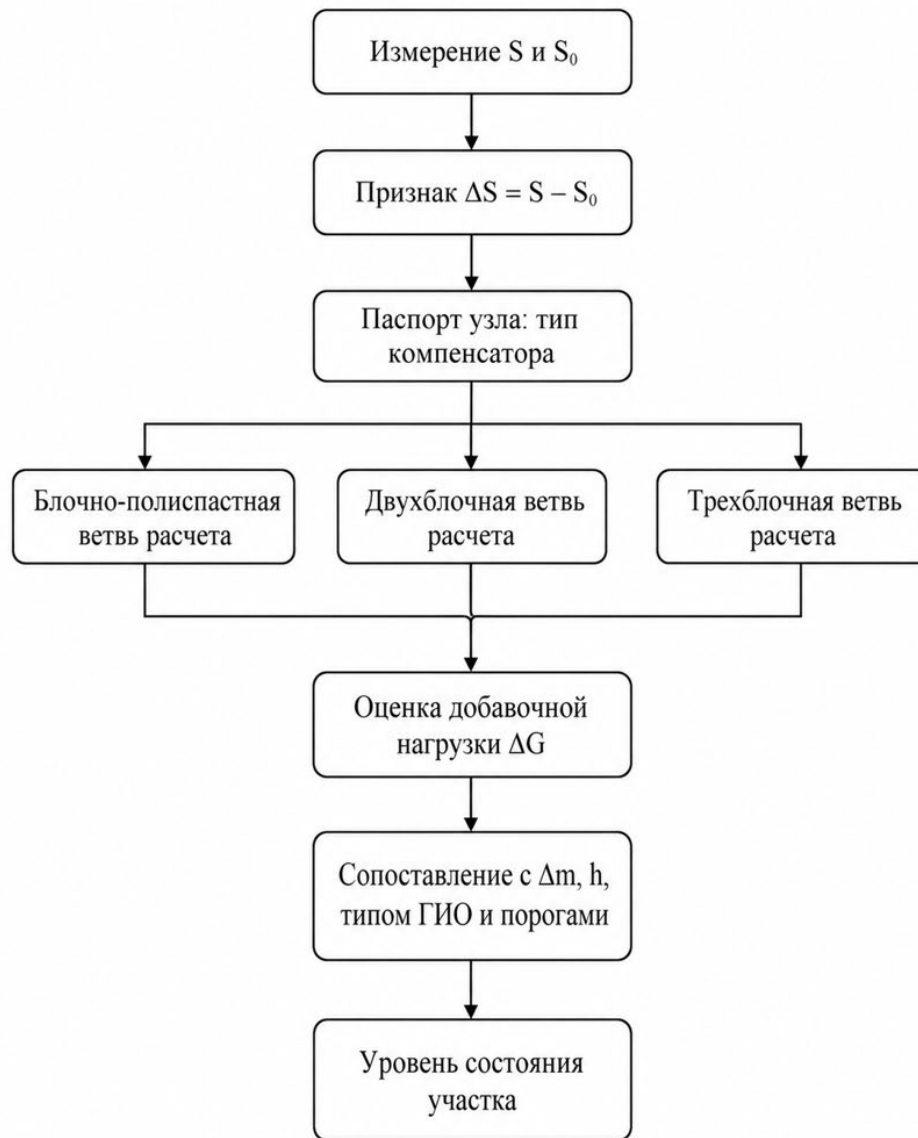


Рисунок 3.8 – Принцип работы расчётного ядра АСКВП

Важный элемент расчётного ядра - его связь с паспортом контролируемого узла. В паспорте должны быть прописаны тип компенсирующего устройства, параметры расчётной модели, базовый уровень S_0 и сведения о месте установки датчика. Без такой привязки расчётное ядро не сможет корректно выбрать ветвь обработки и верно интерпретировать полученное ΔS . Поэтому расчётная часть АСКВП должна рассматриваться не отдельно от объекта контроля, а совместно с конкретным анкерным участком и установленным на нём оборудованием.

3.7 Учёт эксплуатационных факторов при интерпретации данных автоматизированной системы контроля веса проводов

Контактная сеть - это объект, который работает на улице в любую погоду, тут уж никуда не денешься. Нормативные документы, конечно, предусматривают учёт климатических, механических и прочих факторов, влияющих на состояние проводов и тросов [3, 4, 36]. Но для АСКВП это означает одно: сигнал с датчика нельзя рассматривать сам по себе, его нужно оценивать в контексте тех условий, в которых он получен.

Эксплуатационные факторы, влияющие на работу АСКВП, удобно разделить на несколько групп.

Первая группа - внешние условия. Температура, ветер, осадки, влажность, образование гололёда и изморози. Эти факторы могут как реально менять нагрузку на провода, так и вызывать кратковременные колебания сигнала, с гололёдом не связанные. Температура, например, сама по себе не добавляет массу на провод, но запросто может изменить положение элементов подвески или вызвать дрейф измерительного канала. Поэтому длительное изменение (S), связанное с температурой, не должно автоматом трактоваться как гололёд. Для этого в алгоритме предусмотрены сезонная проверка и запрет автоматического обновления (S_0) при положительном тренде.

С ветром тоже самое. Он вызывает колебания проводов и ветвей компенсирующего устройства, что даёт кратковременные изменения усилия в контролируемом узле. Такие изменения имеют колебательный или импульсный характер и должны отделяться от устойчивого роста нагрузки. Поэтому при обработке нужно смотреть не только на амплитуду (ΔS), но и на то, сколько оно держится, возвращается ли к исходному уровню, повторяется ли и совпадает ли с метеоданными.

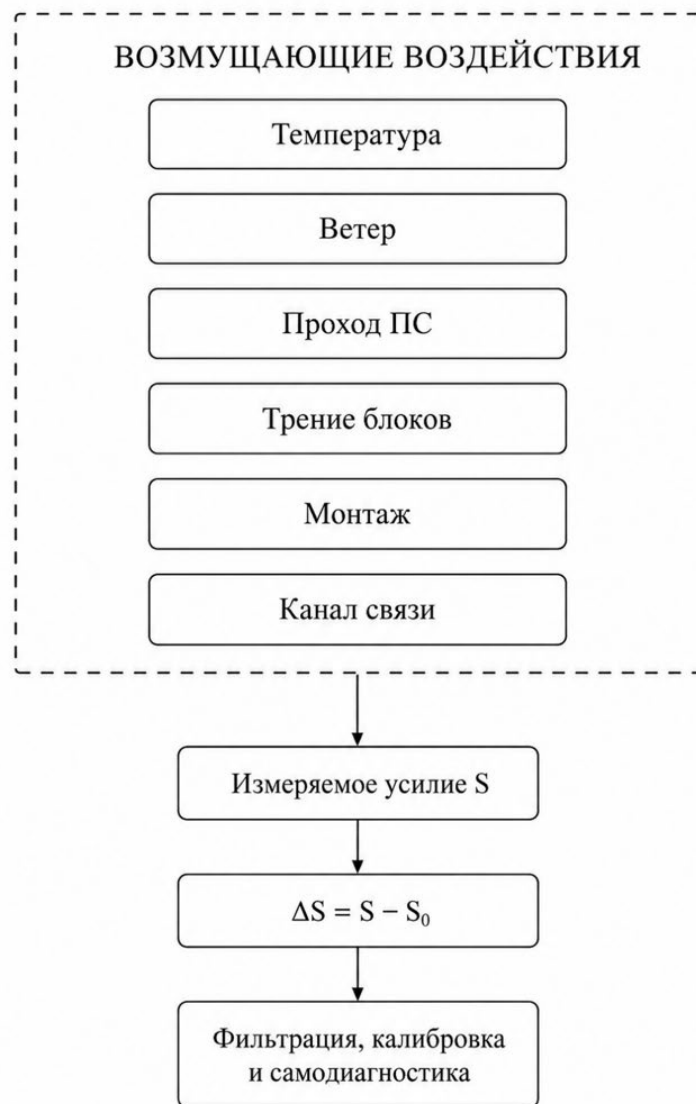


Рисунок 3.9 - Схема влияния эксплуатационных факторов на измеряемое усилие S и диагностический признак ΔS

Вторая группа - техническое состояние компенсирующего устройства. Трение в блоках, состояние канатов, положение грузов, перекосы, износ, загрязнение, обледенение подвижных частей, особенности монтажа - всё это может изменить передачу усилия к точке контроля, хотя никакой новой нагрузки на проводах нет. Если компенсатор начинает работать не так, как предполагает расчётная модель, чувствительность измерительного узла к реальной дополнительной нагрузке может серьёзно отличаться от расчётной.

Поэтому расчётное ядро должно знать не абстрактную схему компенсатора, а конкретные данные из паспорта узла.

Особенно это касается состояния блоков и канатов. В нормальной работе компенсатор передаёт усилия по своей схеме - будь то блочно-полиспастная, двухблочная или трёхблочная система. Но как только появляется повышенное трение, заедание или неравномерность хода, часть изменения нагрузки может дойти до датчика совсем не так, как мы ожидаем. АСКВП в таком случае зафиксирует изменение (S), но интерпретировать его как (ΔG) нужно будет с осторожностью. Правильнее будет разделить сообщения: одно - о возможном изменении нагрузки, второе - служебное, о необходимости проверить компенсатор.

Третья группа - факторы, связанные с самим измерительным каналом. Даже при неизменном состоянии контактной подвески показания могут изменяться из-за нестабильности питания, потери связи, насыщения АЦП, обрыва цепи, повышенного шума, зависания модуля или сбоя калибровки. Такие нарушения не имеют никакого отношения к гололёдообразованию, но алгоритм без самодиагностики запросто может принять их за изменение нагрузки.

Поэтому в структуре АСКВП нужно предусмотреть контроль исправности канала. Признаки сбоя: резкий выход сигнала за допустимый диапазон, долгое отсутствие изменений отсчётов, подозрительно высокий шум, потеря связи, нестабильное питание или несогласованность между соседними циклами. Если система видит что-то из этого, она не должна выдавать сообщение о гололёде. Вместо этого - служебное сообщение о неисправности.

Четвёртая группа - организационно-эксплуатационные факторы. Ремонт, регулировка, замена датчика, обслуживание компенсатора, сезонная подготовка, очистка и смазка – всё это может изменить базовый уровень (S_0) безо всякого гололёда. Если такие события не фиксировать в паспорте, система может принять новое исходное состояние за диагностическое отклонение.

Поэтому после любых регламентных работ - повторная проверка и, если надо, обновление базового уровня. Основные эксплуатационные факторы и способы их учёта сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Учёт эксплуатационных факторов при интерпретации данных АСКВП

Группа факторов	Возможное влияние на сигнал	Способ учёта в АСКВП
Температура окружающей среды	Смещение базового уровня, изменение условий работы компенсатора, дрейф измерительного канала	Сезонная проверка, контроль тренда S , запрет обновления S_0 при устойчивом росте
Ветер и вибрации	Кратковременные колебания и импульсные отклонения сигнала	Фильтрация, анализ длительности отклонения, проверка устойчивости ΔS
Осадки, влажность, ГИО	Возможное устойчивое увеличение нагрузки на провода и тросы	Сопоставление ΔS с метеоданными и расчётная оценка ΔG
Состояние блоков и канатов	Изменение передачи усилия к точке контроля, отличие фактической чувствительности от расчётной	Паспорт узла, периодический осмотр, уточнение параметров расчётной модели
Трение и заедание элементов	Искажение связи между дополнительной нагрузкой и измеряемым усилием S	Служебное сообщение о необходимости проверки компенсатора
Нестабильность питания и связи	Ложные скачки, пропуски данных, потеря временной последовательности	Самодиагностика измерительного канала, отбраковка недостоверных отсчётов
Замена датчика или ремонт узла	Изменение калибровочной характеристики и базового уровня S_0	Повторная калибровка, новая запись в паспорте измерительного узла
Сезонная подготовка	Изменение исходного состояния перед зимним периодом	Проверка рабочего уровня S_0 , подтверждение отсутствия признаков ГИО

Из таблицы видно: эксплуатационные факторы – это не просто помехи, которые надо давить фильтрами. Часть из них реально указывает на изменение состояния подвески, часть - на технические проблемы узла. Задача АСКВП - не исключить их влияние (это невозможно), а научиться разделять их по характеру проявления в сигнале.

Для раннего выявления гололёда важно не абсолютное значение (S), а устойчивое приращение (ΔS) относительно правильно заданного (S_0). Устойчивость нужно оценивать во времени: сигнал дёрнулся и вернулся - мимо, это не событие. Изменение сохраняется, нарастает, подтверждается в нескольких интервалах - уже можно передавать в расчётное ядро.

Хорошим подспорьем к тензометрическому признаку служат метеорологические данные. Например, устойчивый рост (ΔS) на фоне температуры и влажности, подходящих для гололёдообразования, весит совсем иначе, чем те же цифры при сухой и ясной погоде. Поэтому метеоданные – это контекст, дополнительный уровень проверки.

Гололёдоопасная обстановка не всегда означает, что отложения реально образуются на конкретном участке. А отсутствие неблагоприятной погоды не гарантирует, что где-то локально не появились ГИО. Приоритет остаётся за силовым признаком (ΔS).

Ещё один важный момент: нужно чётко разделять предупреждение о росте нагрузки и сообщение о неисправности самой системы. Если канал нестабилен - даже большое изменение сигнала не должно трактоваться как гололёд. Система должна сказать: "связь потеряна", "питание нестабильно", "нужна проверка узла". Это повышает доверие к системе - персонал видит не только что происходит с сетью, но и в каком состоянии средство контроля.

Для такого разделения в программной части нужно предусмотреть несколько независимых признаков достоверности: исправность датчика, устойчивость сигнала, допустимость диапазона, стабильность питания, наличие связи, корректность обновления (S_0). Только когда все флаги зелёные - (ΔS) можно пускать в расчёт.

Не менее важно накапливать статистику. На старте пороги и интервалы можно задать по моделям, но потом их нужно уточнять по факту: по сезонам, по типам компенсаторов, по климатическим районам, по реакции измерительного узла и по подтверждённым событиям. Это не отменяет расчётную модель, а приближает её к реальности. Основные направления повышения достоверности сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 - Основные направления повышения достоверности работы АСКВП

Направление	Содержание	Ожидаемый результат
Уточнение расчётных моделей	Введение поправок на трение, монтажные особенности и фактическую чувствительность узла	Сближение расчётной ветви с реальным поведением компенсатора
Самодиагностика	Контроль питания, связи, насыщения, неизменного сигнала и повышенного шума	Разделение предупреждения о нагрузке и отказа системы контроля
Учёт внешних данных	Сопоставление ΔS с температурой, влажностью, осадками и ветром	Повышение правдоподобности предупреждений
Накопление статистики	Сравнение событий по типам компенсаторов и условиям эксплуатации	Уточнение порогов без потери единого интерфейса для персонала
Паспортизация измерительных узлов	Фиксация S_0 , места установки, типа компенсатора, калибровочных коэффициентов и истории работ	Корректная интерпретация сигнала для конкретного объекта контроля
Уточнение пороговых уровней	Разделение уровней «норма», «наблюдение», «предупреждение» и «опасный рост нагрузки»	Снижение числа ложных срабатываний и повышение эксплуатационной полезности
Регламент повторной калибровки	Проверка измерительного узла после работ, замены датчика или изменения крепления	Исключение ошибочного сравнения текущего сигнала со старым S_0

В практической реализации данные АСКВП лучше выдавать персоналу не в виде набора технических параметров, а в виде двух разделённых сообщений. Первое - о состоянии участка: норма, наблюдение, предупреждение, опасный рост. Второе - о состоянии измерительного узла: исправен, требуется проверка, нарушена связь, нестабильное питание, ошибка калибровки. Это исключает ситуацию, когда тех. неисправность принимают за гололёд, или наоборот - реальное изменение нагрузки тонет в общем сообщении о нестабильности.

Таким образом, учёт эксплуатационных факторов - это не отказ от расчётной модели, а понимание границ её применимости. АСКВП сохраняет физически понятный признак - изменение усилия в узле компенсатора, - но дополняет его фильтрацией, калибровкой, самодиагностикой, метеоконтекстом, паспортизацией и накоплением статистики.

В итоге интерпретация данных строится по многоступенчатой логике: сначала проверка исправности канала, затем устойчивость изменения (S), затем корректность (S_0), потом расчётная оценка (ΔG), и только потом - диагностическое сообщение. Такая последовательность повышает достоверность раннего выявления гололёда и одновременно снижает вероятность ложных срабатываний от внешних воздействий и тех. состояния узла.

3.8 Выводы по главе

В третьей главе мы разработали структуру измерительного комплекса АСКВП - системы, которая регистрирует изменение усилия в контролируемой точке компенсирующего устройства и готовит данные для последующей расчётной интерпретации. Следует подчеркнуть: АСКВП не ограничивается

применением отдельного тензометрического датчика. Это измерительно-расчётная система со своей внутренней логикой, куда входят механический узел восприятия усилия, измерительный канал, средства питания и передачи данных, алгоритмы обработки и калибровки, а также расчётное ядро. Каждый из этих элементов - отдельная задача, и пренебрежение любой из них сведёт на нет усилия по остальным.

Обоснован состав измерительного комплекса и предложена структура АСКВП в составе анкерного участка контактной сети. Корректная работа системы возможна только при согласованном взаимодействии механического, измерительного, информационно-расчётного и эксплуатационного уровней. При этом измерительный комплекс обеспечивает получение значения усилия (S) и выделение приращения (ΔS), а вот расчётная интерпретация уже выполняется с учётом типа компенсирующего устройства - и это принципиально, потому что одна и та же цифра для разных схем компенсации может означать совершенно разную нагрузку.

Разработан алгоритм регистрации и первичной обработки показаний тензометрического датчика. Смысл его в том, чтобы проверить техническую корректность отсчётов, отфильтровать кратковременные возмущения, сравнить обработанное значение с базовым уровнем (S_0) и выделить устойчивое приращение (ΔS). Важный момент, который мы установили: одиночный скачок сигнала – это не диагностический признак, а просто помеха. Для дальнейшей обработки годится только устойчивое изменение, которое подтверждается во времени.

Предложен порядок калибровки измерительного узла и контроля достоверности измерений. Базовый уровень (S_0) должен задаваться для каждого конкретного компенсирующего устройства - с учётом места установки датчика, состояния узла, параметров измерительного канала и истории выполненных работ. Чтобы исключить ошибочную интерпретацию, предусмотрены паспорт измерительного узла, повторная калибровка после любого вмешательства и, что особенно важно, запрет автоматического

обновления (S_0) при наличии положительного тренда или признаков неустойчивости сигнала. Автоматическое обновление S_0 в таких условиях – недопустимо.

Определён принцип работы расчётного ядра АСКВП. Его главная задача - перейти от подготовленного (ΔS) к оценке дополнительной нагрузки (ΔG), выбрав нужную расчётную ветвь для блочно-полиспастной, двухблочной или трёхблочной системы компенсации. Такой подход позволяет использовать зависимости из главы 2 как основу алгоритмической обработки, не выводя все математические модели заново.

Рассмотрены эксплуатационные факторы, которые влияют на интерпретацию данных АСКВП. Температура, ветер, вибрации, состояние блоков и канатов, неустойчивость питания, потеря связи, ремонтные работы и изменение базового уровня – всё это может исказить измеряемое усилие (S) и диагностический признак (ΔS). Для повышения достоверности работы системы предложено использовать фильтрацию, самодиагностику, паспортизацию измерительных узлов, учёт метеопараметров и накопление статистики подтверждённых событий.

Таким образом, в главе сформирована инженерная основа построения АСКВП как измерительно-расчётной системы. Разработанные структурные и алгоритмические решения обеспечивают полный цикл: от изменения силового состояния контактной подвески к измеряемому признаку (ΔS), его проверке, калибровочной привязке, расчётной оценке (ΔG) и, наконец, формированию диагностической информации для эксплуатационного персонала. Полученные результаты создают базу для дальнейшей работы - рассмотрения методики применения АСКВП при обнаружении признаков гололёдообразования на малодеятельных участках контактной сети.

4 ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЕСА ПРОВОДОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОЛЁДООБРАЗОВАНИЯ НА МАЛОДЕЯТЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

4.1 Постановка вопроса

В предыдущих главах диссертации были сформированы расчётные и технические положения, необходимые для применения автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети. В главе 2 получены зависимости, связывающие дополнительную вертикальную нагрузку на провода и тросы контактной подвески с приращением усилия в выбранной точке тензометрического контроля. В главе 3, в свою очередь, рассмотрены состав измерительного комплекса, структура АСКВП, алгоритмы регистрации и первичной обработки показаний - калибровка, контроль достоверности измерений и, собственно, принцип работы расчётного ядра.

Задача настоящей главы состоит в переходе от расчётного и технического обоснования к порядку практического применения АСКВП. Основное внимание уделяется малодеятельным участкам контактной сети - тем самым, где получение оперативной информации от локомотивных бригад ограничено нерегулярным движением поездов, а начальные признаки изменения состояния контактной подвески могут длительное время оставаться незафиксированными.

Следует отметить, что в рассматриваемой постановке АСКВП не заменяет действующие регламенты содержания контактной сети и не принимает самостоятельного решения о проведении противогололёдных мероприятий. Её назначение заключается в регистрации устойчивого изменения нагрузочного состояния контактной подвески и формировании

диагностического признака, который может быть использован эксплуатационным персоналом при оценке текущей ситуации на контролируемом участке. Проще говоря, АСКВП является не заменой существующих средств контроля и эксплуатационных решений, а дополнительным источником информации, используемым в составе общей системы наблюдения за состоянием контактной сети и подготовки противогололёдных мероприятий [6, 12, 14, 15, 36].

При практическом использовании важно учитывать, что информативным является не само значение усилия S в отдельный момент времени, а его изменение относительно базового уровня S_0 . Единичные отклонения показаний датчика, вызванные помехами, кратковременными механическими воздействиями или нестабильностью измерительного канала, не могут рассматриваться как достаточное основание для вывода о начале гололёдообразования. Диагностическое значение имеет только устойчивое приращение ΔS - то, которое сохраняется во времени, прошло первичную фильтрацию и не противоречит результатам контроля достоверности измерительного узла.

Расчётная оценка ΔG в этом случае используется как количественное пояснение к зарегистрированному изменению нагрузочного состояния. Прямым измерением массы гололёдно-изморозевых отложений она, конечно, не является, поскольку определяется с использованием расчётных зависимостей, типа компенсирующего устройства и принятых условий интерпретации сигнала.

Дальнейшее изложение направлено на обоснование порядка применения АСКВП на малодеятельных участках контактной сети. В главе рассматриваются предпосылки использования системы, последовательность работы с данными тензометрического контроля, алгоритм информационной поддержки персонала, функциональный макет измерительного узла, результаты проверки информативности выбранной точки контроля и

ограничения, определяющие направления дальнейшего развития предложенного подхода.

4.2 Предпосылки применения автоматизированной системы контроля веса проводов на малодеятельных участках контактной сети

Применение АСКВП имеет смысл в первую очередь для тех участков контактной сети, где традиционные источники информации о её состоянии работают нерегулярно. К таким объектам относятся малодеятельные участки электрифицированных железных дорог. Основная их особенность - увеличенные интервалы между проходами поездов. Из-за этого снижается частота фактического наблюдения за состоянием токосъёма, искрением, наличием наледи на элементах подвески и другими внешними признаками неблагоприятного режима.

На участках с интенсивным движением локомотивные бригады сами по себе являются источником первичной информации о состоянии контактной сети. Появились явные признаки ухудшения токосъёма или искрения - данные передаются дежурному персоналу и учитываются при оценке ситуации. На малодеятельных участках такой канал контроля не может считаться устойчивым - он напрямую привязан к графику движения и моменту фактического прохода электроподвижного состава через контролируемую зону. В этих условиях особое значение приобретают средства технического мониторинга, не зависящие от факта прохода поезда и способные давать информацию о состоянии объекта в межпоездные интервалы [1, 2, 14, 15].

Для таких участков важен контроль не только уже выраженных последствий гололёдообразования, но и ранних признаков изменения нагрузочного состояния контактной подвески. На начальной стадии образования гололёдно-изморозевых отложений дополнительная вертикальная

нагрузка на провода и тросы уже способна менять силовое состояние компенсирующего устройства, хотя внешние признаки ещё не проявляются. В такой ситуации тензометрический контроль даёт дополнительный измерительный признак, который не связан ни с проходом поезда, ни с визуальным наблюдением силами локомотивной бригады. Основные предпосылки применения АСКВП на малодеятельных участках приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Предпосылки применения АСКВП на малодеятельных участках контактной сети

Особенность малодеятельного участка	Эксплуатационное следствие	Значение для применения АСКВП
Увеличенные интервалы между проходами поездов	Внешние признаки гололёдообразования могут быть обнаружены с задержкой	Требуется измерительный контроль, не зависящий от факта прохода электроподвижного состава
Ограниченность сообщений от локомотивных бригад	Снижается регулярность поступления первичной информации о состоянии контактной сети	АСКВП формирует дополнительный канал информации для эксплуатационного персонала
Начальная стадия гололёдообразования может протекать без выраженных внешних признаков	Персонал получает информацию преимущественно после ухудшения токосъёма или появления искрения	Информативным становится устойчивое изменение усилия S в выбранной точке контроля
Нежелательность размещения дополнительных устройств на рабочей части контактного провода	Установка оборудования непосредственно на провод может усложнять эксплуатацию и влиять на условия токосъёма	Измерительный узел целесообразно размещать в зоне компенсирующего устройства

Особенность малодеятельного участка	Эксплуатационное следствие	Значение для применения АСКВП
Необходимость предварительной оценки неблагоприятного режима	Требуется время для сопоставления данных, подготовки осмотра или противогололёдных мероприятий	Данные АСКВП могут использоваться для информационной поддержки принятия решений
Потребность в накоплении локальной эксплуатационной статистики	Для конкретного участка важно учитывать сезонные и режимные особенности изменения усилия	Накопленные данные позволяют уточнять базовый уровень S_0 и пороги диагностических сообщений

Предпосылка, связанная с размещением измерительного узла, заслуживает отдельного внимания. Установка датчиков непосредственно на контактный провод или несущий трос на полностью компенсированной подвеске не всегда оправдана, и тому есть причины. Эти элементы связаны с перемещением системы компенсации и условиями токосъёма, так что любое вмешательство в их конструкцию чревато последствиями. Размещение тензометрического датчика в зоне компенсирующего устройства позволяет использовать существующую силовую схему подвески и регистрировать изменение усилия в точке, где приращение нагрузки проявляется более устойчиво.

Контролируемым параметром в такой схеме является усилие S , а диагностическое значение имеет его устойчивое изменение относительно базового уровня S_0 . Когда на провода и тросы контактной подвески начинает действовать дополнительная вертикальная нагрузка, компенсирующее устройство не устраняет это изменение полностью - оно только перераспределяет его в механической системе. Поэтому приращение ΔS можно рассматривать как признак изменения нагрузочного состояния, а

расчётная оценка ΔG выполняется с использованием зависимостей из главы 2 и алгоритмов обработки, описанных в главе 3.

Эксплуатационная ценность АСКВП для малодеятельных участков состоит не в автоматическом назначении противогололёдных мероприятий, а в своевременной передаче персоналу дополнительной информации. Полученное сообщение может использоваться для сопоставления с метеорологическими условиями, усиленного наблюдения за участком, подготовки осмотра или принятия дальнейших действий согласно действующим эксплуатационным документам [6, 12, 36]. При таком подходе АСКВП дополняет существующий порядок содержания контактной сети и снижает зависимость первичной информации от нерегулярного движения поездов.

Таким образом, применение АСКВП на малодеятельных участках определяется совокупностью технических и эксплуатационных предпосылок. К техническим относится возможность регистрации изменения усилия в зоне компенсирующего устройства без размещения измерительного оборудования на рабочей части контактного провода. К эксплуатационным - необходимость получения раннего измерительного признака в условиях ограниченного визуального контроля. Совместное действие этих факторов и формирует основу для дальнейшей разработки методики применения АСКВП при обнаружении признаков гололёдообразования.

4.3 Предлагаемая методика применения автоматизированной системы контроля веса проводов при обнаружении признаков гололёдообразования

Методика применения АСКВП решает одну задачу - как от технически подготовленного измерительного узла перейти к информации, понятной эксплуатационному персоналу, о возможном изменении нагрузочного

состояния контактной подвески. Повторный вывод зависимостей между ΔS и ΔG здесь не рассматривается - они уже получены в предыдущих главах. Речь идёт об уже готовой измерительно-расчётной системе и порядке её использования на малодеятельном участке.

Основным объектом применения АСКВП является участок контактной сети, где изменение нагрузки на провода и тросы передаётся в компенсирующее устройство и может быть зарегистрировано в выбранной точке тензометрического контроля. Ввиду этого привязка системы должна идти не только к типу контактной подвески, но и к конкретному анкерному участку - его компенсирующему устройству, месту установки датчика, условиям обслуживания и принятому порядку передачи информации персоналу. Общая структурная схема АСКВП, используемая при формировании методики, приведена на рисунке 4.1.

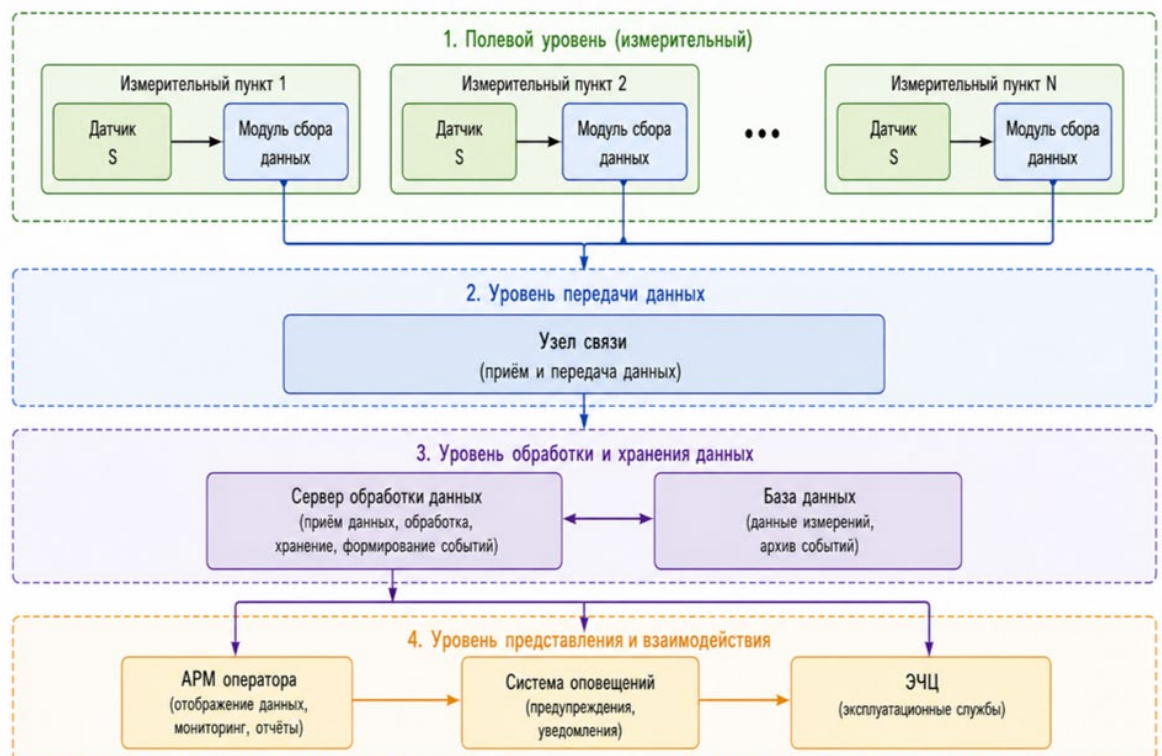


Рисунок 4.1 – Общая структурная схема АСКВП, используемая при формировании методики

Методика включает несколько последовательных этапов. Первым этапом является выбор контролируемого участка. Определяется малодеятельный участок, для которого требуется дополнительный измерительный контроль нагрузочного состояния контактной подвески. Результат - установлена зона применения АСКВП.

Второй этап - паспортизация точки контроля. Фиксируются тип компенсирующего устройства, место установки датчика, состояние механических элементов, особенности передачи усилия. Результат - сформирован паспорт измерительного узла.

Третий этап - установка измерительного узла. Тензометрический датчик размещается в выбранной точке. Основное условие - установка не должна нарушать штатную работу компенсирующего устройства. После этого обеспечивается регистрация усилия S .

Четвёртый этап - начальная настройка. Проверяется измерительный канал, задаётся базовый уровень S_0 , определяются условия его дальнейшего использования. Базовый уровень определяется в период нормального нагрузочного состояния контролируемого участка - когда признаки гололёдообразования отсутствуют, а сигнал измерительного канала стабилен. Значение S_0 задаётся для конкретного измерительного узла и не должно автоматически меняться при появлении устойчивого положительного тренда, резком увеличении разброса отсчётов, потере связи с датчиком или после незафиксированного вмешательства в механическую часть. При регламентной проверке, сезонной настройке или изменении схемы крепления базовый уровень уточняется повторно.

После настройки система переводится в режим наблюдения. На этом этапе выполняется регулярная регистрация усилия S , первичная проверка достоверности отсчётов, фильтрация кратковременных выбросов, определение приращения относительно базового уровня. Единичные отклонения сигнала, вызванные помехами, кратковременными механическими воздействиями или нестабильностью измерительного канала, не должны

расцениваться как диагностический признак. Для интерпретации используется только устойчивое изменение ΔS , подтверждённое во времени.

Когда устойчивое приращение ΔS выделено, система переходит к расчётной интерпретации. Задействуется расчётное ядро АСКВП и зависимости, полученные для соответствующего типа компенсирующего устройства. Результат - расчётная оценка ΔG , количественное пояснение зарегистрированного изменения нагрузочного состояния. ΔG не следует трактовать как прямое измерение массы гололёдно-изморозевых отложений; это расчётный показатель, и зависит он от принятой модели, типа компенсатора и качества исходных данных.

Для эксплуатационного применения важна не только сама расчётная оценка ΔG , но и её сопоставление с внешними условиями. Поэтому при наличии устойчивого ΔS данные АСКВП необходимо рассматривать совместно с метеорологической информацией, температурой воздуха, сведениями об осадках, ветровой обстановке, данными осмотров и сообщениями персонала. Такое сопоставление снижает вероятность ошибочной интерпретации сигнала и позволяет отделить признаки возможного гололёдообразования от изменений, вызванных техническим состоянием измерительного узла или особенностями работы компенсирующего устройства. Обобщённая последовательность применения АСКВП при обнаружении признаков гололёдообразования приведена в таблице 4.2.

Сообщение не должно подменять решение персонала - его задача дать дополнительную информацию о состоянии участка и характере зарегистрированного изменения.

Предлагаемая последовательность применения АСКВП опирается на расчётные зависимости, технические решения и алгоритмические принципы обработки данных тензометрического контроля, полученные ранее [33, 35, 55-59].

Таблица 4.2 - Последовательность применения АСКВП при обнаружении признаков гололёдообразования

Этап применения	Содержание этапа	Результат этапа
Выбор контролируемого участка	Определение малодетального участка, для которого требуется дополнительный измерительный контроль нагрузочного состояния контактной подвески	Установлена зона применения АСКВП
Паспортизация точки контроля	Фиксация типа компенсирующего устройства, места установки датчика, состояния механических элементов и особенностей передачи усилия	Сформирован паспорт измерительного узла
Установка измерительного узла	Размещение тензометрического датчика в выбранной точке без нарушения штатной работы компенсирующего устройства	Обеспечена регистрация усилия S
Начальная настройка	Проверка измерительного канала, задание базового уровня S_0 и определение условий его дальнейшего использования	Задан исходный уровень для выделения ΔS
Наблюдение	Регистрация S , фильтрация кратковременных выбросов, проверка достоверности отсчётов	Получено обработанное значение сигнала
Выделение диагностического признака	Определение устойчивого приращения ΔS относительно S_0	Подтверждено изменение нагрузочного состояния
Расчётная интерпретация	Использование расчётного ядра и зависимостей для соответствующего типа компенсатора	Получена расчётная оценка ΔG
Сопоставление с условиями эксплуатации	Проверка сигнала с учётом метеоусловий, состояния измерительного узла, данных осмотров и эксплуатационной информации	Уточнена возможная причина изменения сигнала

Данная методика позволяет использовать АСКВП как постоянно действующий измерительно-расчётный элемент на малодеятельном участке контактной сети. Практическая ценность её в том, что персонал получает не разрозненное показание датчика, а обработанную информацию - есть или нет устойчивое изменение нагрузочного состояния. Дальнейшее использование данной информации требует представления результата в форме эксплуатационного сообщения, что рассматривается в следующем разделе.

4.4 Предлагаемый алгоритм информационной поддержки принятия решений на основании данных тензометрического контроля

Данные тензометрического контроля необходимо представлять эксплуатационному персоналу в такой форме, которая позволяет быстро оценить состояние контролируемого участка, но при этом не подменяет установленный порядок принятия решений. Именно поэтому в составе АСКВП целесообразно выделять не только измерительную и расчётную части, но и информационный контур, предназначенный для формирования сообщения о состоянии участка контактной сети.

Назначение данного контура состоит в переводе обработанных измерительных данных в эксплуатационно понятный статус. На вход информационного алгоритма поступает подготовленный результат работы измерительного комплекса: значение усилия в точке контроля, признак устойчивости изменения, статус достоверности измерительного канала, паспорт контролируемого узла и расчётная оценка дополнительной нагрузки при её наличии. В отличие от первичной обработки, рассмотренной в главе 3, данный этап не занимается фильтрацией отдельных отсчётов и не выполняет повторную калибровку. Его задача - определить, какое сообщение должно быть передано персоналу и насколько оно может быть использовано при оценке

текущей эксплуатационной ситуации. Информационное взаимодействие АСКВП с эксплуатационным персоналом может быть представлено в виде схемы, приведённой на рисунке 4.2.

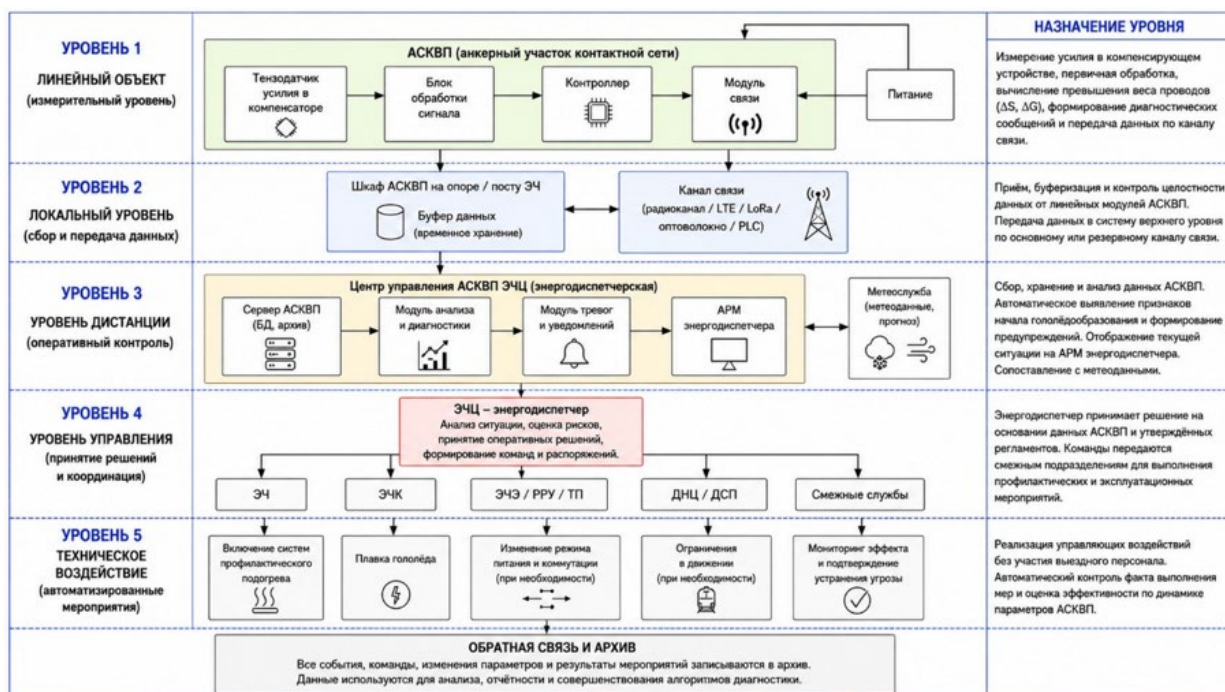


Рисунок 4.2 – Информационное взаимодействие АСКВП с эксплуатационным персоналом

Алгоритм работы информационного контура строится на последовательной проверке условий, определяющих статус контролируемого участка. Первое условие - достоверность данных измерительного канала. Если статус канала указывает на неисправность, потерю связи или нестабильность показаний, формируется сообщение о невозможности использования текущих данных для оценки состояния участка. В такой ситуации персоналу направляется соответствующее уведомление, а данные АСКВП не должны учитываться при принятии решений.

Второе условие - устойчивость зарегистрированного изменения ΔS . При отсутствии устойчивого приращения или при его величине ниже установленного порога формируется сообщение о нормальном режиме

нагрузочного состояния контролируемого участка. Данный статус не требует дополнительных действий со стороны эксплуатационного персонала и не является основанием для проведения внеочередных осмотров.

Третье условие - сопоставление зарегистрированного изменения с эксплуатационными и метеорологическими данными. При наличии устойчивого ΔS сверх установленного порога система переходит к анализу внешних условий. Очевидно, что само по себе устойчивое изменение усилия не является однозначным признаком гололёдообразования - оно может быть вызвано иными причинами, включая изменение температуры, механическое воздействие или особенности работы компенсирующего устройства. Именно поэтому сопоставление с метеорологическими данными, сведениями об осадках, температурном режиме и ветровой обстановке является обязательным этапом.

По результатам данного сопоставления формируется одно из следующих сообщений:

- "Устойчивое изменение нагрузочного состояния зарегистрировано при метеоусловиях, благоприятных для гололёдообразования". Данное сообщение является основанием для усиленного наблюдения за участком и подготовки к возможному проведению противогололёдных мероприятий;

- "Устойчивое изменение нагрузочного состояния зарегистрировано, однако метеоусловия не соответствуют типичным условиям гололёдообразования". В данном случае сообщение информирует персонал о необходимости дополнительной проверки состояния измерительного узла и оценки возможных причин изменения сигнала;

- "Изменение нагрузочного состояния не зарегистрировано, метеоусловия благоприятны для гололёдообразования". Данное сообщение указывает на то, что при текущих погодных условиях признаков увеличения нагрузки на провода и тросы не выявлено, однако контроль должен быть продолжен ввиду сохранения неблагоприятного прогноза.

Важно отметить, что информационный контур АСКВП не принимает самостоятельного решения о проведении противогололёдных мероприятий. Его задача - обеспечить персонал обработанной и структурированной информацией, на основании которой эксплуатационный персонал уже принимает решение в соответствии с действующими регламентами и эксплуатационными документами [6, 12, 36].

Практическая ценность предлагаемого алгоритма состоит в том, что данные тензометрического контроля преобразуются из численных значений усилия S и его приращения ΔS в эксплуатационно значимые сообщения. Персонал получает не сырые показания датчика, а готовый диагностический признак, который может быть сопоставлен с текущей эксплуатационной ситуацией. Данный подход позволяет снизить нагрузку на персонал по интерпретации данных измерений и сократить время от момента регистрации изменения нагрузочного состояния до принятия соответствующего решения.

4.5 Функциональный макет измерительного узла тензометрического контроля веса проводов контактной подвески

Для проверки работоспособности предложенного измерительного принципа использован функциональный макет измерительного узла. Его назначение - не полное воспроизведение реального анкерного участка, а физическая проверка возможности регистрации изменения усилия в выбранной точке контроля при увеличении нагрузки на моделируемый провод.

В отличие от расчётного рассмотрения из главы 2, функциональный макет позволяет перейти к предметной проверке самой идеи тензометрического контроля. В данной постановке важно установить, что дополнительное нагружение проводника даёт измеримый отклик в контролируемом узле, а регистрируемое изменение усилия пригодно для

последующей обработки в составе АСКВП. Схематичное расположение основных элементов функционального макета приведено на рисунке 4.3.

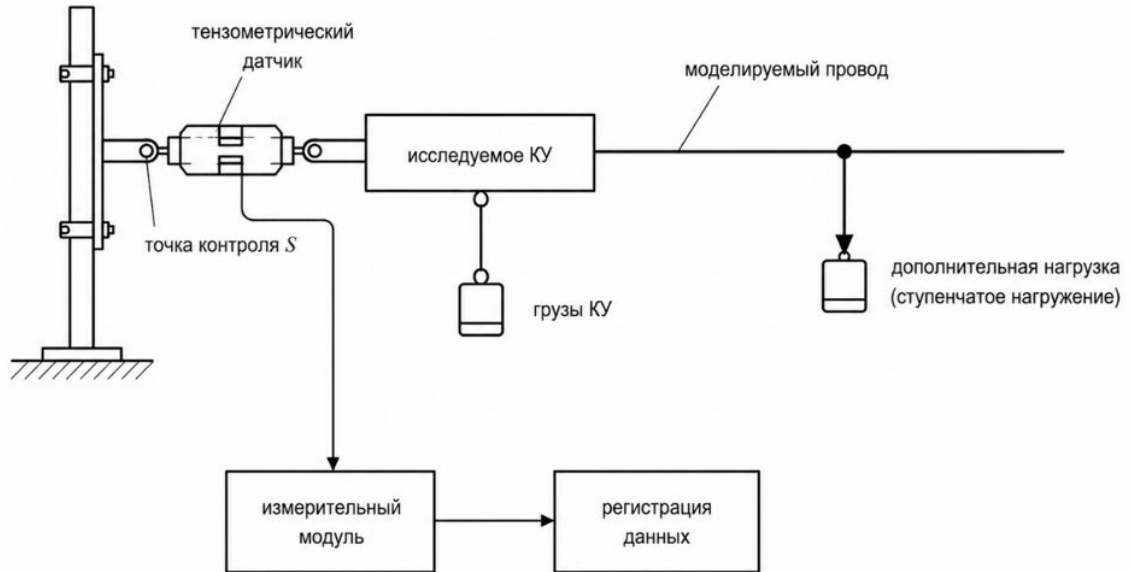


Рисунок 4.3 — Схема функционального макета измерительного узла тензометрического контроля

На схеме функционального макета исследуемое компенсирующее устройство показано условно. Данный способ изображения выбран намеренно, поскольку задача рисунка состоит не в детализации конкретной блочной схемы, а в пояснении общей экспериментальной логики: дополнительная нагрузка прикладывается к моделируемому проводу, изменение нагрузочного состояния передаётся через исследуемое КУ, а тензометрический датчик регистрирует изменение усилия S в выбранной точке контроля. Далее сигнал поступает в измерительный канал и блок регистрации.

Макет размещён в лаборатории. Две противоположные стены лаборатории выполняют роль опор контактной сети. Между стенами натянут медный провод, моделирующий провод контактной подвески. Натяжение провода регулируется винтовым натяжным устройством на одной из стен и контролируется по показаниям тензодатчика.

Тензометрический датчик S-образного типа (номинальная нагрузка до 50 кг) установлен в разрыв провода у неподвижной стены. Вся нагрузка от натяжения передаётся через чувствительный элемент. Выбор точки у неподвижной стены обусловлен тем, что в ней регистрируется полное усилие без потерь на трение.

Нагружение моделируемого провода выполнялось подвешиванием тарированных грузов к проводу в средней части пролёта. Грузы подвешивались равномерно. Вес грузов - порядка 120-130 г.

Измерительный канал включает тензодатчик, аналого-цифровой преобразователь и блок регистрации на базе микроконтроллера. Регистрация показаний - с частотой 10 Гц. Данные передаются на ПК для обработки и визуализации. Общий вид реализованного функционального макета приведён на рисунке 4.4.

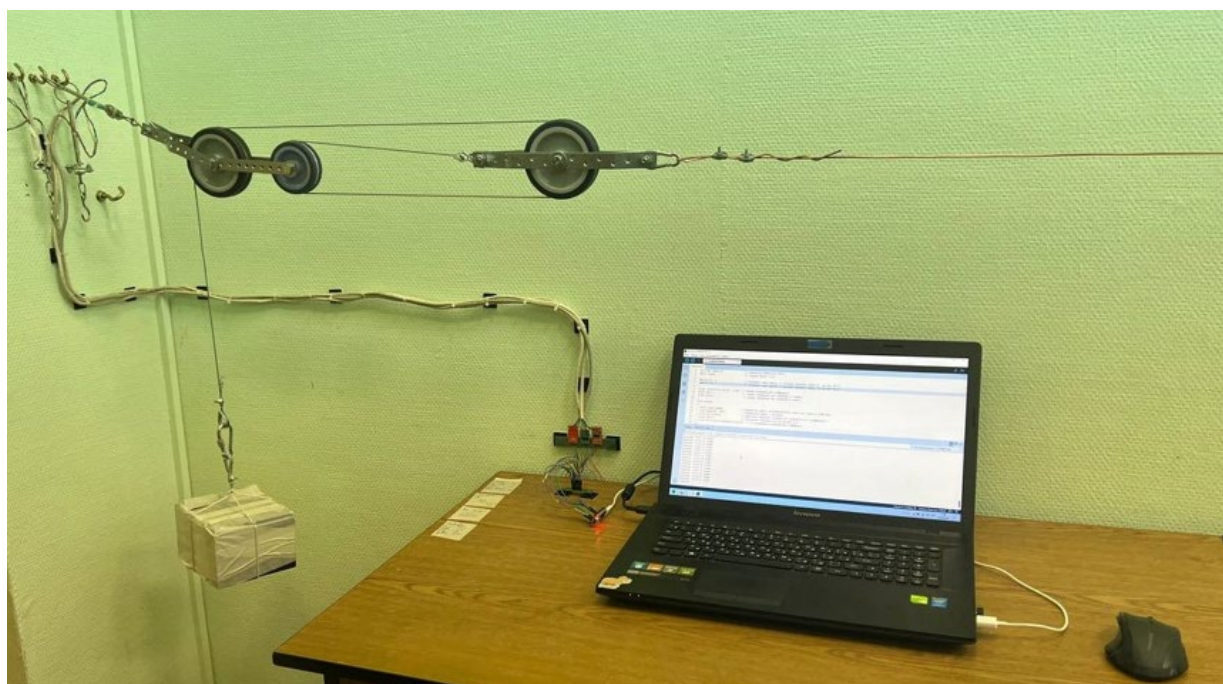


Рисунок 4.4 — Внешний вид реализованного функционального макета измерительного узла

Состав основных элементов функционального макета приведён в таблице 4.3.

Проверка работоспособности макета выполнена в несколько этапов. На первом этапе проведена тарировка измерительного канала: к датчику

прикладывались известные нагрузки, регистрировались показания и строилась тарировочная характеристика.

Таблица 4.3 — Состав функционального макета измерительного узла тензометрического контроля

Элемент функционального макета	Назначение элемента	Связь с задачей проверки
Моделируемый проводник	Воспроизведение участка провода, на который вводится дополнительная нагрузка	Позволяет оценить реакцию системы на изменение нагрузочного состояния
Узел закрепления проводника	Обеспечение устойчивого положения проводника и сохранение схемы нагружения	Исключает произвольное изменение условий опыта
Исследуемое КУ	Передача изменения нагрузки от проводника к точке контроля	Формирует механическую связь между дополнительной нагрузкой и усилием S
Тензометрический датчик	Регистрация усилия в выбранной точке	Является основным измерительным элементом
Измерительный модуль	Преобразование и передача сигнала датчика	Обеспечивает получение численного значения контролируемого усилия
Средства регистрации данных	Фиксация показаний и их изменения во времени	Позволяют анализировать отклик контролируемой точки
Набор дополнительных грузов	Ступенчатое нагружение модели	Используется для проверки чувствительности выбранной точки контроля

На втором этапе выполнена серия экспериментов с подвешиванием грузов к проводу. Регистрировалось начальное усилие, затем подвешивались

грузы и фиксировалось установившееся значение усилия после затухания колебаний. Изменение усилия соответствует приложенной нагрузке. В ходе экспериментов регистрировались колебания усилия, вызванные переходными процессами. Переходный процесс затухает за 2-5 с, после чего показания стабилизируются. В алгоритмах обработки АСКВП необходима задержка для завершения переходных процессов.

На третьем этапе выполнена проверка чувствительности к минимальным изменениям нагрузки. Подвешивались грузы от 50 до 500 г. Изменение усилия уверенно регистрируется от 100 г и выше. При меньших значениях сигнал на уровне шумов канала. Порог чувствительности - около 100 г.

Таким образом, данные с функционального макета подтверждают возможность регистрации изменения веса провода тензометрическим методом. Линейность характеристики, чувствительность и погрешность позволяют рассматривать метод как основу для АСКВП.

4.6 Результаты проверки информативности выбранной точки тензометрического контроля

Основной задачей описываемой проверки являлось установление того, проявляется ли изменение нагрузочного состояния моделируемого провода в точке, выбранной для установки тензометрического датчика. Для АСКВП это имеет определяющее значение. Если дополнительная нагрузка воспринимается отдельными элементами макета, но не приводит к регистрируемому изменению усилия в точке контроля, - такая точка не может рассматриваться как информативная. Если же при нагружении появляется направленное и выделяемое изменение (S), то выбранная точка пригодна для дальнейшего использования в измерительно-расчётной схеме системы.

Следует отметить, что проверка проводилась в режиме ступенчатого нагружения. После стабилизации исходного состояния фиксировался базовый уровень (S_0), затем на моделируемый провод вводилась дополнительная нагрузка. Такой порядок позволил сравнить три характерных участка записи: исходное состояние, участок повышенных показаний при нагружении и последующий возврат к уровню, близкому к исходному. При этом особое внимание уделялось не единичным отсчётам, а изменению общего уровня показаний тензометрического датчика.

На рисунке 4.5 приведён фрагмент регистрации показаний тензометрического датчика при ступенчатом нагружении моделируемого провода.

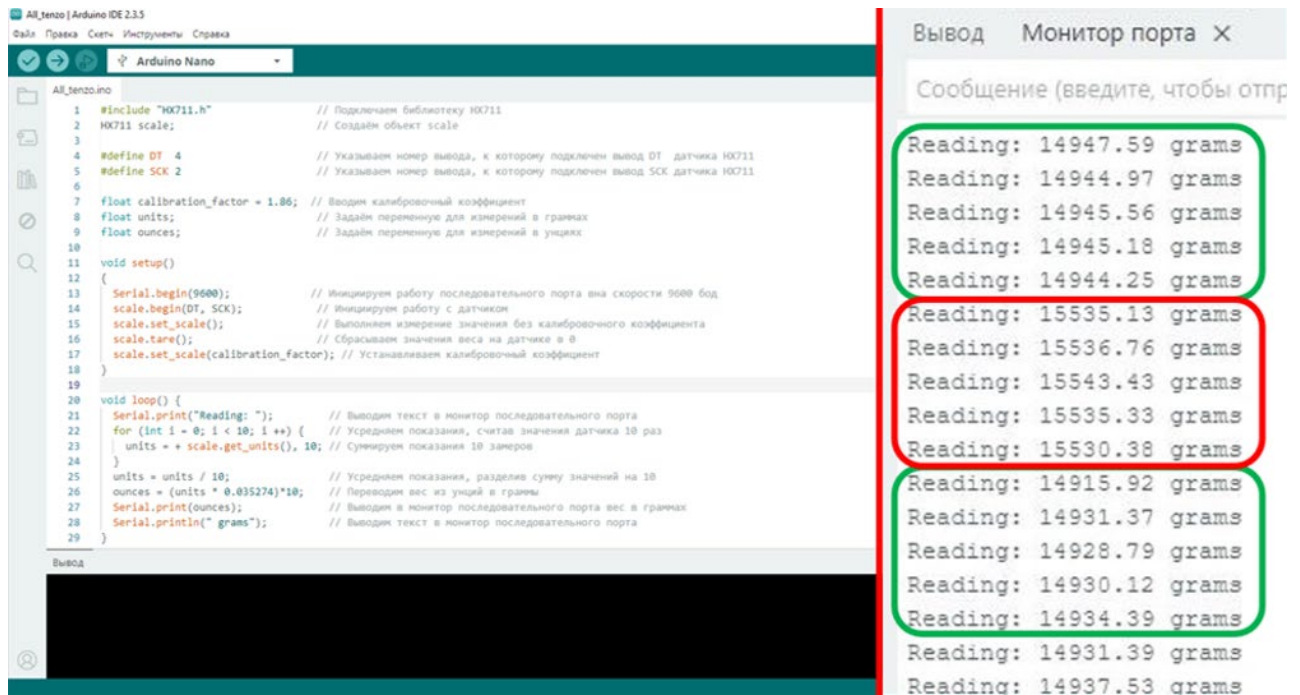


Рисунок 4.5 — Фрагмент регистрации изменения усилия S при ступенчатом нагружении моделируемого провода

По приведённому фрагменту видно, что при приложении дополнительной нагрузки показания тензометрического датчика переходят на более высокий уровень. После снятия нагрузки происходит обратное изменение, и сигнал возвращается к значениям, близким к исходному состоянию. Наличие такого устойчивого перехода подтверждает, что

выбранная точка контроля чутко реагирует на изменение нагрузочного состояния моделируемого провода.

Для более наглядной оценки характера изменения показаний, на основании данных фрагмента записи, было построено графическое представление - оно приведено на рисунке 4.6.

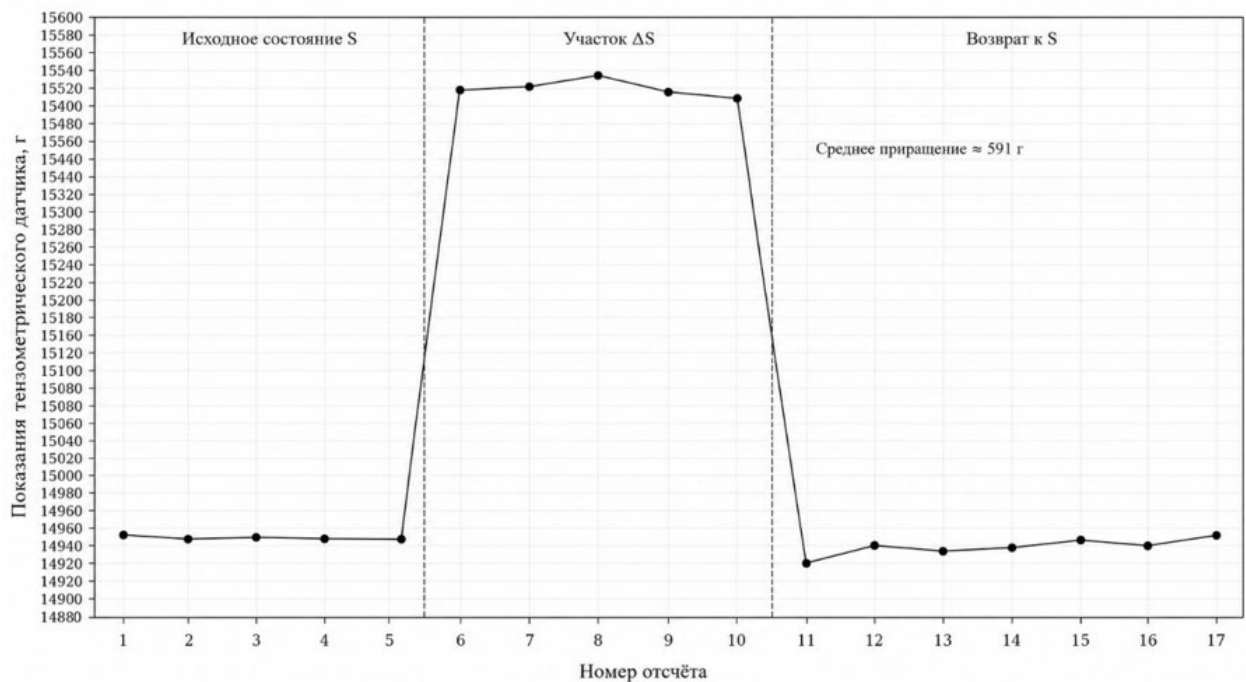


Рисунок 4.6 – Графическое представление изменения показаний тензометрического датчика при ступенчатом нагружении

На графике отчётливо выделяются три участка. Первый соответствует исходному состоянию измерительного узла до приложения дополнительной нагрузки - средний уровень показаний на нём составляет порядка 14945,5 г. Второй участок соответствует нагруженному состоянию моделируемого провода: средний уровень возрастает примерно до 15536,2 г, приращение относительно исходного составляет около 591 г. После снятия нагрузки показания возвращаются к уровню около 14930 г, что подтверждает обратимый характер зарегистрированного изменения в пределах выполненной проверки.

Следует подчеркнуть, что полученный результат важен не как точное воспроизведение реального процесса образования гололёдно-изморозевых

отложений, а как подтверждение измерительной информативности выбранной точки контроля. При ступенчатом нагружении моделируемого провода в этой точке возникает регистрируемое изменение усилия (S), которое может быть выделено относительно базового уровня (S_0). Иными словами, измерительный узел способен формировать исходный признак для последующей обработки в составе АСКВП. Обобщённые результаты проверки сведены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 — Результаты проверки информативности выбранной точки контроля

Проверяемый признак	Наблюдаемое проявление	Значение для АСКВП
Наличие отклика S при нагружении	При введении дополнительной нагрузки регистрируется изменение усилия в точке контроля	Подтверждается измерительная пригодность выбранной точки
Устойчивость изменения S	После переходных колебаний сигнал сохраняет направленное изменение относительно S_0	Возможно выделение ΔS как диагностического признака
Ступенчатый характер изменения	Переход между исходным и нагруженным состоянием сопровождается изменением уровня показаний	Подтверждается возможность регистрации дискретного изменения нагрузки
Влияние механических переходных процессов	Наблюдаются локальные отклонения, связанные с перестановкой грузов и работой механической части	Требуется фильтрация и анализ устойчивости сигнала
Возможность дальнейшей обработки	Изменение S может быть выделено относительно базового уровня	Результат пригоден для передачи в алгоритм интерпретации

Проведённая проверка, таким образом, показывает, что выбранная точка контроля обладает требуемой информативностью для регистрации изменения

нагрузочного состояния. При увеличении нагрузки на моделируемый провод усилие (S) изменяется таким образом, что его можно выделить относительно исходного уровня и использовать как входной признак для дальнейшей обработки. Вместе с тем стоит отметить, что численные значения, полученные на функциональном макете, не следует напрямую переносить на реальную контактную сеть. Материал проводника, длина моделируемого участка, условия закрепления и отсутствие эксплуатационных воздействий – всё это ограничивает прямую сопоставимость опытных данных с натурным объектом.

Отдельного внимания, на мой взгляд, заслуживает характер изменения силы натяжения моделируемого провода. При работе компенсирующего устройства увеличение нагрузки не обязательно сопровождается пропорциональным ростом натяжения (Q) – часть изменения воспринимается и перераспределяется механической системой, поэтому более информативным для рассматриваемой схемы является именно контроль усилия (S) в выбранной точке. Это обстоятельство лишний раз подтверждает целесообразность размещения тензометрического датчика не на рабочей части провода, а в зоне компенсирующего устройства.

Таким образом, проверка на функциональном макете подтвердила возможность регистрации изменения усилия в выбранной точке тензометрического контроля при ступенчатом нагружении моделируемого провода. Наличие исходного уровня, участка повышенных показаний и последующего возврата к уровню, близкому к исходному, позволяет рассматривать (S) как выделяемый измерительный признак изменения нагрузочного состояния. Полученный результат, очевидно, служит основанием для дальнейшего использования выбранной точки контроля в алгоритмах обработки и информационной поддержки АСКВП.

4.7 Ограничения применения автоматизированной системы контроля веса проводов и направления дальнейших исследований

Результаты предыдущих разделов показывают возможность тензометрического контроля для регистрации изменения нагрузки. Однако переход от макета к АСКВП на действующих участках требует рассмотрения ограничений. Они не отменяют полученных результатов, но задают границы их интерпретации и определяют направления дальнейшего развития системы.

Диагностический признак. АСКВП регистрирует изменение усилия в точке контроля и формирует признак изменения нагрузочного состояния. Этот признак физически связан с появлением дополнительной вертикальной нагрузки, но не является прямым подтверждением наличия гололёдно-изморозевых отложений. Сообщение системы - основание для эксплуатационной оценки, а не окончательное заключение о состоянии провода.

Расчётный характер ΔG . Дополнительная нагрузка на основании ΔS - результат применения математической модели и расчётного ядра. На неё влияют тип КУ, состояние механических элементов, качество калибровки, устойчивость S_0 , корректность расчётной зависимости. ΔG - ориентировочная оценка, а не прямое измерение массы отложений.

Уровень проверки. Функциональный макет подтвердил информативность точки при ступенчатом нагружении, но не воспроизводит весь комплекс воздействий действующей контактной сети. Не учитываются температурные деформации, ветер, неравномерность отложений по длине анкерного участка, динамика от ЭПС, влияние среды на измерительный узел. Результаты макетной проверки - подтверждение принципа, а не натурная проверка. Нужны испытания на реальном анкерном участке.

Пороги сообщений. На начальном этапе определяются по расчётным зависимостям и характеристикам узла. Универсальные пороги для всех участков могут быть неточными. Отклик системы зависит от типа подвески, марки провода, схемы КУ, состояния блоков и канатов, климатических условий, особенностей участка.

Эксплуатационная статистика. Нужны данные о сезонном изменении S_0 , характере отклонений, чувствительности разных КУ, сопоставлении сообщений с осмотрами и метеоусловиями. Статистика позволит уточнять пороги и снижать риск ошибок.

Аппаратное исполнение. Макет не предназначен для длительной эксплуатации на открытом воздухе. Требуется защищённый измерительный узел с учётом влаги, низких температур, вибраций, электромагнитных помех, загрязнения. Важны ремонтпригодность, безопасность, устойчивость питания, дистанционный контроль. Это критично для малодеятельных участков с ограниченным доступом персонала.

Интерпретация сигнала. Изменение S может быть вызвано не только гололёдом, но и положением грузов, трением в блоках, неравномерностью канатных ветвей, механическими воздействиями, нарушением крепления датчика. Данные АСКВП должны использоваться с паспортом узла и сведениями о его техническом состоянии.

Организационное ограничение. АСКВП не является автономной системой управления противогололёдными мероприятиями. Её роль - предоставление дополнительной информации. Решение об осмотре, плавке или продолжении наблюдения принимает персонал. Основные ограничения и направления исследований приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 — Ограничения применения АСКВП и направления дальнейших исследований

Ограничение	Содержание ограничения	Направление дальнейших исследований
Косвенный характер диагностического признака	Система регистрирует изменение усилия S , а не само гололёдно-изморозевое отложение	Сопоставление данных АСКВП с осмотрами, метеоданными и подтверждёнными эксплуатационными событиями

Ограничение	Содержание ограничения	Направление дальнейших исследований
Расчётный характер ΔG	Дополнительная нагрузка определяется через модель и зависит от типа компенсирующего устройства	Уточнение расчётных зависимостей с учётом фактического состояния КУ, трения и монтажных особенностей
Ограниченность макетной проверки	Функциональный макет не воспроизводит весь комплекс воздействий действующей контактной сети	Проведение опытной проверки на реальном анкерном участке
Необходимость задания порогов	Универсальные пороги предупреждения без накопления статистики могут быть недостаточно точными	Формирование базы наблюдений по типам участков, маркам проводов и климатическим условиям
Требования к аппаратному исполнению	Макетная измерительная часть не предназначена для длительной эксплуатации на открытом воздухе	Разработка промышленного измерительного узла с защитой, устойчивым питанием и самодиагностикой
Риск ошибочной интерпретации сигнала	Изменение S может быть вызвано не только гололёдообразованием, но и техническим состоянием узла	Развитие алгоритмов контроля достоверности и разделения эксплуатационных причин изменения сигнала
Интеграция в работу персонала	Сообщение системы должно быть понятно и пригодно для принятия решений	Разработка формата эксплуатационных сообщений и порядка взаимодействия с ЭЦ и обслуживающим персоналом

Дальнейшие исследования - не изменение идеи тензометрического контроля, а уточнение условий её применения. Основные направления:

натурная проверка, уточнение расчётных зависимостей, защищённое исполнение, накопление статистики, формирование обоснованных порогов.

Таким образом, АСКВП - перспективный элемент информационной поддержки, требующий дальнейшей проверки на действующей контактной сети. Полученные результаты подтверждают работоспособность направления, но практическое применение должно учитывать ограничения измерительного признака, расчётной интерпретации ΔG , состояния КУ и условий эксплуатации конкретного участка.

4.8 Выводы по главе

В четвёртой главе рассмотрен порядок применения АСКВП для обнаружения признаков гололёдообразования на малодеятельных участках. В отличие от предыдущих глав, внимание уделено не расчётному выводу зависимостей и не построению измерительного комплекса, а условиям использования системы как средства информационной поддержки персонала.

Предпосылки применения АСКВП на малодеятельных участках связаны с ограниченностью визуального контроля, зависимостью сообщений от графика движения и необходимостью раннего измерительного признака. Тензометрический контроль в зоне КУ формирует дополнительный канал информации, не привязанный к проходу ЭПС.

Предложена методика применения АСКВП: выбор участка, паспортизация точки, установка узла, задание S_0 , регистрация S , выделение ΔS , расчётная интерпретация, передача сообщения. ΔG - количественное пояснение, а не прямое измерение массы отложений.

Для представления результатов предложен алгоритм информационной поддержки. Он позволяет перейти от показаний датчика к уровням состояния:

норма, наблюдение, предупреждение, опасный рост, недостоверные данные. Это снижает риск упрощённой трактовки.

Проверка на макете подтвердила: при ступенчатом нагружении в контролируемой точке возникает изменение S . Есть исходный уровень, участок повышенных показаний и возврат. ΔS может выделяться относительно S_0 .

Определены ограничения: косвенный характер признака, расчётная природа ΔG , макетный уровень проверки, необходимость уточнения порогов, разработка промышленного исполнения. Требуется проверка на действующем участке, накопление статистики, сопоставление с осмотрами и метеоданными.

В главе обосновано применение АСКВП как средства раннего выявления признаков изменения нагрузочного состояния. Результаты завершают переход от расчётных моделей и структуры комплекса к методике практического использования и определению направлений дальнейшего развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решалась задача раннего обнаружения гололёдообразования на малодеятельных 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 малодеятельных 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 метеообстановкой.

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", "недостоверные данные". АСКВП - информационная поддержка, не замена регламентов.

На функциональном макете выполнена проверка работоспособности подхода - тарировка 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р. – URL: <https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112030006> (дата обращения: 29.07.2026).
2. Комплексная программа инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года (КПИР-2030) / ОАО «РЖД». – URL: <https://company.rzd.ru/ru/12382> (дата обращения: 29.07.2026).
3. ГОСТ 32679-2014. Контактная сеть железной дороги. Технические требования и методы контроля. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 20 с. – URL: <https://protect.gost.ru/gost/details/0e870179-04e0-481c-b6d0-cfaec8444603> (дата обращения: 29.07.2026).
4. ГОСТ 33944-2016. Подвеска железной дороги контактная. Технические требования и методы контроля. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 16 с. – URL: <https://protect.gost.ru/gost/details/7f474b21-c131-4799-af01-3f30f73c4893> (дата обращения: 29.07.2026).
5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*: утвержден приказом Минстроя России от 03.12.2016 № 891/пр: с изменениями № 1–6. – URL: <https://protect.gost.ru/sp/details/bac9e1fe-45f1-401b-8e32-949f4ee27821> (дата обращения: 29.07.2026).
6. Методические указания по борьбе с гололёдом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПР, автоблокировки и продольного электроснабжения. Книга 1 / ОАО «РЖД», Департамент электрификации и электроснабжения. – 2004.
7. ГОСТ 32793-2014. Токоём токоприемником железнодорожного электроподвижного состава. Номенклатура показателей качества и методы их определения. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 15 с. – URL:

<https://protect.gost.ru/gost/details/bdb5347e-d2e6-4484-a23f-94eef052d5d9> (дата обращения: 29.07.2026).

8. Марквардт, К. Г. Контактная сеть: учебник для вузов железнодорожного транспорта / К. Г. Марквардт. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Транспорт, 1994. – 335 с. – ISBN 5-277-01713-5.

9. Кубкина, О. В. Функционально-технологическая структура системы раннего обнаружения гололёдно-изморозевых образований на проводах и тросах контактной подвески электрических железных дорог / О. В. Кубкина // Транспорт-2008. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2008. – Ч. 3. – С. 211–212.

10. Кубкина, О. В. Методы обнаружения гололёдно-изморозевых образований на проводах и тросах контактной подвески и высоковольтных линиях электропередач / О. В. Кубкина // Транспорт-2008. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2008. – Ч. 3. – С. 208–210.

11. Трубицин, М. А. Анализ способов обнаружения гололёда на проводах ЛЭП и их применение для контактной сети / М. А. Трубицин, О. Г. Лукашевич // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4. – С. 1–11.

12. Инструкция по подготовке к работе и обеспечению надежности работы устройств электроснабжения в зимний период: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2019 № 2542/р: в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 01.03.2024 № 570/р.

13. Инструкция о порядке применения токоприемников электроподвижного состава при различных условиях эксплуатации на сети железных дорог и взаимодействия работников причастных подразделений ОАО «РЖД» и сервисных компаний в случаях повреждения токоприемников и устройств контактной сети: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 30.04.2020 № 962/р. – URL: https://meganorm.ru/mega_doc/dop_norm/53/instruktsiya_po_podgotovke_k_rabo_te_v_zimniy_period_i/0/rasporyazhenie_oao_rzhd_ot_30_04_2020_N_962_r_ob.html (дата обращения: 29.07.2026).

14. Бутенко, Е. А. Совершенствование технологии эксплуатации контактной сети за счет применения распределенной автономной системы контроля и диагностики: специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бутенко Елена Александровна; Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2021. – 168 с.

15. Фроленков, С. А. Совершенствование диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог на основе сквозных цифровых технологий: специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Фроленков Сергей Андреевич; Самарский государственный университет путей сообщения. – Самара, 2023. – 181 с.

16. Галкин, А. Г. Математическое моделирование и информационные технологии в задачах диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог: монография / А. Г. Галкин, А. Н. Митрофанов, С. А. Митрофанов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012. – 226 с. – ISBN 978-5-94614-236-6.

17. Система удалённого мониторинга состояния железнодорожной контактной сети / К. Ю. Долинский, А. А. Лыков, В. А. Соколов, В. Б. Соколов, Г. В. Осадчий // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 5. – С. 44–47.

18. N vik, P. A wireless railway catenary structural monitoring system: full-scale case study / P. N vik, A. R nnquist, S. Stichel // Case Studies in Structural Engineering. – 2016. – Vol. 6. – P. 22–30. – DOI: 10.1016/j.csse.2016.05.003. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.csse.2016.05.003> (дата обращения: 29.07.2026).

19. Непрерывный мониторинг натяжения контактной подвески / Г. Ф. Насонов, Ю. А. Черногоров, М. Е. Медведев, Г. В. Осадчий, Д. В. Седых, Д. Н. Пристенский, В. Л. Иванов, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 228–258.

20. Патент на полезную модель № 99165 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/04. Устройство для измерения натяжения проводов и тросов: №

2010118196/28: заявл. 05.05.2010: опубл. 10.11.2010 / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, И. Е. Чертков, С. В. Заренков, Е. М. Дербиллов; патентообладатель Омский государственный университет путей сообщения. – Бюл. № 31. – 2 с.

21. Патент № 2823373 С1 Российская Федерация, МПК В60М 1/12, В60М 1/26. Автоматизированная система контроля веса проводов контактной сети железной дороги: № 2024103146: заявл. 08.02.2024: опубл. 22.07.2024 / В. А. Осипов, В. Н. Черных, Н. В. Черных; патентообладатель В. А. Осипов. – Бюл. № 21. – 8 с.

22. 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. – URL: https://doi.org/10.46973/0201-727X_2026_2_37 (дата обращения: 29.07.2026).

23. Беляев, И. А. Взаимодействие токоприёмников и контактной сети / И. А. Беляев, В. А. Вологин. – Москва: Транспорт, 1983. – 191 с.

24. Kiessling, F. Contact Lines for Electrical Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance / F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider. – 3rd ed. – Berlin: Wiley-VCH, 2017. – 1104 p. – ISBN 978-3-89578-420-0. – URL: <https://www.wiley-vch.de/en/areas-interest/engineering/contact-lines-for-electrical-railways-978-3-89578-420-0> (дата обращения: 29.07.2026).

25. Liu, Z. Advances of research on high-speed railway catenary / Z. Liu, Y. Song, Y. Han, H. Wang, J. Zhang, Z. Han // Journal of Modern Transportation. – 2018. – Vol. 26, No. 1. – P. 1–23. – DOI: 10.1007/s40534-017-0148-4. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40534-017-0148-4> (дата обращения: 29.07.2026).

26. Смердин, А. Н. Совершенствование системы токосъема магистральных электрических железных дорог в условиях высокоскоростного и тяжеловесного движения: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Смердин Александр Николаевич;

Омский государственный университет путей сообщения. – Омск, 2018. – 600 л.

27. Голубков, А. С. Совершенствование методов и аппаратных средств определения рациональных параметров скоростных контактных подвесок: автореф. дис.... канд. техн. наук / А. С. Голубков. – Омск, 2009. – 16 с.

28. Кудряшов, Е. В. Механические расчеты контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей / Е. В. Кудряшов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 3 (24). – С. 258–269.

29. Порцелан, А. А. Борьба с гололедом на электрифицированных железных дорогах / А. А. Порцелан, И. В. Павлов, А. А. Неганов. – Москва: Транспорт, 1970. – 152 с.

30. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах: учебное пособие / И. И. Левченко, А. С. Засыпкин, А. А. Аллилуев, Е. И. Сацук. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. – 444, [1] с. – ISBN 978-5-383-00048-9.

31. Минуллин, Р. Г. Локационное обнаружение гололёда на воздушных линиях электропередачи. Ч. 1. Способы обнаружения гололёда / Р. Г. Минуллин, В. А. Касимов, Т. К. Филимонова, М. Р. Яруллин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2014. – № 2 (193). – С. 61–73.

32. Совершенствование методики оценки риска ущерба от гололёдообразования на проводах контактной сети ввиду отсутствия устройств удаления гололёда / А. Н. Смердин, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков, А. С. Голубков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 182–189. – DOI: 10.46973/0201-727X_2025_1_182. – URL: https://doi.org/10.46973/0201-727X_2025_1_182 (дата обращения: 29.07.2026).

33. 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. – С. 110–118. – DOI: 10.46973/0201-727X_2024_2_110. – URL: https://doi.org/10.46973/0201-727X_2024_2_110 (дата обращения: 29.07.2026).

34. Черных, В. Н. Некоторые способы выявления гололёдно-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.

35. Осипов, В. А. 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.

36. Правила технического содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий, шунтирующих линий и линий электропередачи: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 18.08.2021 № 1812/р. – URL: https://www.sptgt.ru/upload/iblock/44e/0cbjjwlm8vs93ocyiw1wsfc4yg08km02/PR_AVILA-tekhnicheskogo-soderzhaniya-kontaktnoy-seti-_1812r-ot-18.08.2021.pdf (дата обращения: 29.07.2026).

37. СП 224.1326000.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги: утвержден приказом Минтранса России от 02.12.2014 № 330. – URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/pravila/1/sp_224_1326000_2014_svod_pravil_tyagovoe_elektrosnabzhenie.html (дата обращения: 29.07.2026).

38. Контактная сеть и воздушные линии: иллюстративное пособие по техническому обслуживанию и ремонту контактной сети и воздушных линий / под ред. Г. Б. Якимовой; ОАО «РЖД», Департамент электрификации и электроснабжения. – Москва: Трансиздат, 2006. – 296 с.

39. Контактная сеть и воздушные линии: нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтным линиям:

справочник / ОАО «РЖД», Департамент электрификации и электроснабжения. – Москва: Трансиздат, 2006. – 576 с.

40. Бойко, Т. А. Разработка и исследование сигнализаторов гололёда для электротяговых сетей, линий ДПР и ВЛ автоблокировки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Т. А. Бойко. – Ростов-на-Дону: РИИЖТ, 1972.

41. Купцов, Ю. Е. Беседы о токосъёме, его надёжности, экономичности и путях совершенствования / Ю. Е. Купцов. – Москва: Модерн-А, 2001. – 256 с.

42. Жарков, Ю. И. Диагностика текущего состояния контактной сети в области дугового токосъёма / Ю. И. Жарков, Ю. Г. Семёнов // Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: материалы VIII Международного симпозиума «Элтранс-2015». – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2017. – С. 172–177. – ISBN 978-5-7641-1084-4.

43. ГОСТ Р 59965-2021. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электрические сети. Системы плавки гололеда на проводах и грозозащитных тросах линий электропередачи. Выбор и обоснование принципиальных технических решений: утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 23.12.2021 № 1837-ст. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200182305> (дата обращения: 29.07.2026).

44. Патент № 2444449 С1 Российская Федерация, МПК В60М 1/12. Способ и система диагностики и удаленного мониторинга контактной сети железной дороги: № 2010137656/11: заявл. 07.09.2010: опубл. 10.03.2012 / В. Г. Непомнящий, Г. В. Осадчий, Д. Н. Пристенский, А. А. Лыков, В. А. Соколов, В. Б. Соколов, К. Ю. Долинский; патентообладатель ООО «Мостовое бюро». – Бюл. № 7. – 10 с.

45. Седых, Д. В. Программные средства системы мониторинга контактной подвески / Д. В. Седых, Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий // Мир транспорта. – 2016. – Т. 14, № 6. – С. 166–179. – DOI: 10.30932/1992-3252-2016-

14-6-17. – URL: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2016-14-6-17> (дата обращения: 29.07.2026).

46. Шапиро, К. С. Системы мониторинга контактной сети на железной дороге / К. С. Шапиро, В. А. Соколов, В. Б. Соколов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 3 (28). – С. 99–106.

47. Жарков, Ю. И. Основы алгоритма распознавания нарушений токосъёма на фидерных зонах автоматизированной системой контроля / Ю. И. Жарков, Ю. Г. Семенов // Вестник РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2004. – № 3. – С. 105–108.

48. Гаранин, М. А. Анализ потенциала применения сквозных цифровых технологий в системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог / М. А. Гаранин, С. А. Фроленков, Т. С. Максимова // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 1 (97). – С. 19–27. – EDN EHDVJT.

49. Фроленков, С. А. Применение метода триангуляции для диагностики контактной сети / С. А. Фроленков // Наука и образование транспорту. – 2020. – № 1. – С. 365–368. – EDN OTXNFD.

50. Фроленков, С. А. Совершенствование алгоритма определения положения проводов контактной подвески в плане пути с помощью цифровой обработки изображений / С. А. Фроленков // Известия Транссиба. – 2023. – № 2 (54). – С. 9–16. – EDN TXSHPD.

51. Харитонов, Т. В. Своевременное выявление гололёдных отложений на проводах контактной сети при помощи цифровой системы / Т. В. Харитонов, О. В. Табаков // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 1 (97). – С. 45–49.

52. Жарков, Ю. И. Структура системы раннего обнаружения гололёдно-изморозевых образований / Ю. И. Жарков, Ю. Г. Семенов, О. В. Лысенко // Транспорт-2006: труды Всероссийской научно-практической конференции, май 2006 г.: в 3 ч. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2006. – Ч. 3. – С. 136–137.

53. Патент № 2555196 С1 Российская Федерация, МПК G01L 5/04. Способ измерения натяжения длинномерных изделий: № 2013147558/28:

заявл. 24.10.2013: опубл. 10.07.2015 / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, А. С. Голубков, И. Е. Чертков. – Бюл. № 19. – 5 с.

54. Патент № 2681777 С1 Российская Федерация, МПК В60М 1/12, В60М 1/26. Система мониторинга натяжений и перемещений проводов контактной подвески высокоскоростной магистрали: № 2018119993: заявл. 30.05.2018: опубл. 12.03.2019 / Е. В. Кудряшов, А. Б. Русаков; патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». – Бюл. № 8. – 8 с.

55. 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.

56. 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.

57. Осипов, В. А. Математическое обоснование минимально необходимого количества тензодатчиков для корректного контроля гололёдной нагрузки в составе АСКВП / В. А. Осипов, В. Н. Черных. // Известия Транссиба. – 2025. – № 4 (64). – С. 10–19.

58. Черных, В. Н. Метод раннего обнаружения гололёда 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.

59. Черных, В. Н. Методы раннего обнаружения гололёдно-изморозевых образований на контактной сети / В. Н. Черных. // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России («ТрансПромЭк-2024»): сборник научных трудов, посвященный 95-летию

Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 294–298.

60. Марквардт, К. Г. Контактная сеть / К. Г. Марквардт, И. И. Власов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Транспорт, 1977. – 271 с.

61. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи / В. П. Михеев. – Москва: Маршрут, 2003. – 416 с. – ISBN 5-89035-086-2.

62. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети электрифицированных железных дорог / А. В. Фрайфельд, Г. Н. Брод. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Транспорт, 1991. – 335 с. – ISBN 5-277-00796-2.

63. Фрайфельд, А. В. Устройство, сооружение и эксплуатация контактной сети и воздушных линий / А. В. Фрайфельд, Н. А. Бондарев, А. С. Марков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Транспорт, 1987. – 336 с.

64. Горошков, Ю. И. Контактная сеть: учебник для техникумов / Ю. И. Горошков, Н. А. Бондарев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Транспорт, 1990. – 399 с.

65. Бучинский, В. Е. Гололёд и борьба с ним / В. Е. Бучинский – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 192 с.

66. Бургсдорф, В. В. О физике гололёдно-изморозевых явлений / В. В. Бургсдорф // Труды главной геофизической обсерватории. – Л.: Гидрометеиздат, 1947. – № 3. – С. 3–12.

67. Бажанов, П. И. Отложение мокрого снега на проводах линий электропередачи / П. И. Бажанов // Электрические станции. – 1957. – № 10. – С. 60–63.

68. Глухов, В. Г. Метеорологические условия образования гололёда на высотных сооружениях / В. Г. Глухов. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 97 с.

69. Смердин, А. Н. Применение моделей поперечных колебаний растянутого стержня для расчёта натяжений проводов контактной сети / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко // Известия Транссиба. – 2019. – № 4 (40). – С. 25–32.

70. Смердин, А. Н. Экспериментальная проверка качества адаптации математической модели контактной сети для расчёта частоты колебаний / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, А. В. Тарасенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 208–215.

71. Заренков, С. В. Совершенствование измерительных устройств и методов исследования влияния параметров контактной подвески на изменение натяжения проводов / С. В. Заренков, О. А. Ходунова // Инновационный транспорт. – 2013. – № 1 (7). – С. 18–22.

72. Дутов, И. Г. Исследование влияния температуры на натяжение проводов контактной подвески / И. Г. Дутов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 4 (24). – С. 26–36.

73. Левченко, И. И. Программное обеспечение информационной системы раннего обнаружения и борьбы с гололёдом на высоковольтных линиях / И. И. Левченко, Е. И. Сацук // Энерго-инфо. – Москва, 1998.

74. Левченко, И. И. Программное обеспечение информационной системы контроля гололёдообразования / И. И. Левченко, Е. И. Сацук // Электрические станции. – 2004. – № 10. – С. 15–18.

75. Левченко, И. И. Система телеизмерения гололедных нагрузок на воздушных линиях электропередачи 330–500 кВ / И. И. Левченко // Электрические станции. – 1999. – № 12. – С. 39–43.

76. Левченко, И. И. Система телеизмерения гололёдных нагрузок на воздушных линиях электропередачи 6–35 кВ / И. И. Левченко, А. А. Аллилуев, А. В. Лубенец, А. Ф. Дьяков // Электрические станции. – 1999. – № 8.

77. Левченко, И. И. Технические и программные средства по предотвращению и ликвидации гололёдных аварий и опыт их внедрения в ОЭС Северного Кавказа / И. И. Левченко, А. С. Засыпкин, А. А. Аллилуев, Е. И. Сацук // Материалы 22-й сессии семинара «Диагностика электрооборудования». – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000.

78. Елизарьев, А. Ю. Совершенствование системы контроля гололёдно-ветровых нагрузок на воздушных линиях электропередачи / А. Ю. Елизарьев, А. Р. Валеев, Г. А. Громова // Вестник УГАТУ. – Т. 20, № 1 (71). – 2016. – С. 136–142.

79. Громова, Г. А. Разработка новых подходов к контролю гололёдно-ветровых нагрузок на воздушных линиях электропередачи / Г. А. Громова, А. Ю. Елизарьев // Вопросы надёжности работы систем электроснабжения в условиях гололёдно-ветровых нагрузок: мат. междунар. науч.-практ. конф. – Уфа: РИК УГАТУ, 2016. – С. 82–95.

80. Гуревич, М. К. Способы предотвращения аварий, вызванных гололёдообразованием на проводах и грозозащитных тросах ВЛ / М. К. Гуревич, М. А. Козлова, А. В. Репин, Ю. А. Шершнев // Известия НИИ постоянного тока. – СПб: НИИПТ, 2010. – № 64. – С. 237–249.

81. Минуллин, Р. Г. Сравнение показаний аппаратуры локационного зондирования и весовых датчиков при обнаружении гололёдных отложений на линиях электропередачи / Р. Г. Минуллин, В. А. Касимов, М. Р. Яруллин // Энергетика Татарстана. – 2015. – № 2. – С. 19–27.

82. Патент № 2309540 С1 Российская Федерация, МПК H04B 3/54, H02G 7/16. Система передачи сигналов по линии электроснабжения для обнаружения гололедных отложений на проводах: № 2006113055/09: заявл. 18.04.2006: опубл. 27.10.2007 / Г. А. Тюняев, Ю. Т. Переяслов; патентообладатели ОАО энергетики и электрификации «Волгоградэнерго», Волгоградский государственный технический университет. – Бюл. № 30. – 11 с.

83. Патент на полезную модель № 107412 U1 Российская Федерация, МПК H02G 7/16. Система контроля гололедно-ветровых нагрузок: № 2011106852/07: заявл. 22.02.2011: опубл. 10.08.2011 / Ф. Р. Исмагилов, С. В. Зайцев, А. Ю. Елизарьев; патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. – Бюл. № 22. – 2 с.

84. Патент № 2287883 С1 Российская Федерация, МПК H02G 7/16. Способ обнаружения появления гололеда на проводах линии электропередачи: № 2005112401/09: заявл. 15.04.2005: опубл. 20.11.2006 / Р. Г. Минуллин, И. Ш. Фардиев, Ю. Я. Петрушенко, Д. Ф. Губаев, А. К. Мезиков, А. В. Коровин. – Бюл. № 32. – 6 с.

85. Тюняев, Г. А. Система передачи сигналов по линии электроснабжения для определения предельных гололёдных отложений на проводах / Г. А. Тюняев // Прогрессивные технологии в обучении и производстве: материалы 4-й Всероссийской конференции. – Волгоград: КТИ ВолгГТУ, 2006.

86. Хабибуллин, М. С. Опыт усовершенствования и разработки новых принципов телеизмерений гололёдных нагрузок на проводах ВЛ 110–500 кВ / М. С. Хабибуллин // Вторая научно-техническая конференция молодых специалистов электроэнергетики. – Москва, 1999.

87. Горячев, М. П. Система автоматизированного мониторинга силы тяжения провода воздушных линий электропередачи по параметрам кручения и провеса: специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Горячев Михаил Петрович; Казанский государственный энергетический университет. – Казань, 2019. – 130 с.

88. Патент № 2145758 С1 Российская Федерация, МПК H02G 7/16. Устройство для измерения гололедной и ветровой нагрузок на воздушных линиях электропередачи: № 98115729/09: заявл. 17.08.1998: опубл. 20.02.2000 / И. И. Левченко, А. С. Засыпкин, А. А. Аллилуев, А. В. Лубенец; заявители и патентообладатели Новочеркасский государственный технический университет, Региональное предприятие «Южэнерготехнадзор». – Бюл. № 5. – 6 с.

89. Патент на полезную модель № 15151 U1 Российская Федерация, МПК H02G 7/16. Датчик гололедной нагрузки: № 2000113397/20: заявл. 31.05.2000: опубл. 20.09.2000 / А. Ф. Дьяков, И. И. Левченко, А. С. Засыпкин,

А. А. Аллилуев; патентообладатели РАО «ЕЭС России», А. Ф. Дьяков, И. И. Левченко, А. С. Засыпкин, А. А. Аллилуев. – Бюл. № 26. – 8 с.

90. Ефимов, А. В. Надёжность и диагностика систем электроснабжения железных дорог / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – Москва: УМК МПС России, 2000. – 497 с.

91. Условия и предпосылки получения фактических параметров и характеристик контактных подвесок в ходе проведения линейных испытаний / В. М. Павлов, А. Г. Галкин, А. Н. Смердин, И. Е. Чертков, В. Н. Финиченко. // Транспорт Урала. – 2007. – № 3 (14). – С. 51–53.

92. Павлов, В. М. Адаптация методик диагностирования состояния инфраструктуры системы токосяема при повышенных скоростях движения электроподвижного состава / В. М. Павлов, А. Н. Смердин, И. Е. Чертков, П. Г. Тюрнин, М. В. Емельянов // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок и токоприемников электрического транспорта: сборник научных статей с международным участием / Омский государственный университет путей сообщения; отв. ред. В. Т. Черемисин. – Омск, 2011. – С. 56–65.

93. Ли, В. Н. Способ диагностирования контактного провода электрифицированных железных дорог / В. Н. Ли, С. В. Клименко. // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2015. № 1 (2-3). – С. 26–28.

94. Бутенко, Е. А. Диагностическая модель контактной сети для разработки устройства определения натяжения проводов / Е. А. Бутенко // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск: ОмГУПС, 2019. – С. 237–243. – ISBN 978-5-949-41249-7.

95. Бутенко, Е. А. Применение беспроводных элементов сенсорных сетей для определения натяжения контактных проводов и несущих тросов / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной

конференции, посвященной Дню Российской науки / Омский гос. ун-т путей сообщения; отв. ред. И. И. Галиев. – Омск, 2020. – С. 46–50. – ISBN 978-5-949-41255-8.

96. Бутенко, Е. А. Совершенствование методики экспериментального определения натяжения проводов контактной сети на испытательном полигоне / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин, В. М. Павлов // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки / Омский гос. ун-т путей сообщения; отв. ред. И. И. Галиев. – Омск, 2021. – С. 89–94. – ISBN 978-5-949-41272-5.

97. Бутенко, Е. А. Перспективные методы исследования системы токосъема / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: материалы III Международной научно-практической конференции (Омск, 6 декабря 2018 г.) / Омский государственный университет путей сообщения; отв. ред. В. Т. Черемисин. – Омск: ОмГУПС, 2018. – С. 6–12. – ISBN 978-5-949-41221-3.

98. Бутенко, Е. А. Повышение эффективности эксплуатации системы токосъема за счет онлайн-мониторинга основных параметров контактной сети / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин, А. С. Голубков // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта: материалы IV Международной научно-практической конференции в рамках Научно-образовательного форума (Омск, 10 декабря 2020 г.). – Омск: ОмГУПС, 2020. – С. 6–11. – ISBN 978-5-949-41269-5.

99. Бутенко, Е. А. Совершенствование методов исследования контактной сети с помощью автономного измерительного комплекса / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы III всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т

путей сообщения; отв. ред. С. Г. Шантаренко. – Омск, 2018. – С. 225–231. – ISBN 978-5-949-41213-8.

100. Смердин, А. Н. Исследование возможности применения устройств волоконной оптики для контроля параметров контактной сети / А. Н. Смердин, А. С. Голубков, Е. А. Бутенко // Транспорт Урала. – 2019. – № 3 (62). – С. 85–89.

101. Смердин, А. Н. Совершенствование диагностических средств для проведения натурных исследований системы токосъема / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России («ТрансПромЭк-2018»): сборник научных трудов: в 2 т. / Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2018. – Т. 2: Экономические, гуманитарные и юридические науки. – С. 333–336. – ISBN 978-5-88814-750-4.

102. Смердин, А. Н. Совершенствование программно-аппаратного комплекса мониторинга и диагностики контактной сети / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, Г. Р. Ермачков. // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 5 (83). – С. 23–28.

103. Разработка автономного комплекса мониторинга и диагностики системы токосъема: отчет № 2269 о научно-исследовательской работе (заключительный) / руководитель А. Н. Смердин; Омский государственный университет путей сообщения, кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта». – Омск, 2019. – 222 л. – № ГР АААА-А19-119031290012-5. – Инв. № АААА-Б19-219122790113-8.

104. Голубков, А. С. Совершенствование автономных систем диагностики и мониторинга состояния контактной сети / А. С. Голубков, Г. Р. Ермачков, Е. А. Бутенко. // Тезисы десятого международного симпозиума «Eltrans 10.0»: в 2 частях / Петербургский гос. ун-т путей сообщения; под ред. А. Т. Буркова, В. В. Никитина. – Санкт-Петербург, 2019. – Ч. 1. – С. 47–49.

105. ГОСТ Р 55647-2018. Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия: утвержден и

введен в действие приказом Росстандарта от 12.10.2018 № 757-ст: введен в действие 01.03.2019: взамен ГОСТ Р 55647-2013. – Москва: Стандартинформ, 2018. – URL: <https://protect.gost.ru/gost/details/67268df6-65b5-47f1-b744-871bedfc0bf2> (дата обращения: 29.07.2026).

106. 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.

Расчётная табличная база для определения прироста линейной массы
гололёдно-изморозевых отложений по эквивалентному диаметру контактного
провода

Для перехода от расчётной добавочной нагрузки ΔG к инженерно понятному описанию гололёдно-изморозевых отложений используется табличная база. В силовых зависимостях, применяемых при оценке отклика компенсирующего устройства, дополнительная нагрузка задаётся в ньютонах. В эксплуатационной интерпретации удобнее использовать толщину слоя h и прирост линейной массы Δm , г/м. Поэтому расчётная база должна связывать тип отложения, марку контактного провода, толщину слоя и соответствующую добавочную весовую нагрузку на принятой длине контролируемого участка.

Контактный провод имеет фасонный профиль, поэтому для укрупнённого расчёта массы отложений его сечение заменяется равновеликой окружностью. Такой переход позволяет использовать один геометрический параметр — эквивалентный диаметр $d_э$, определяемый по номинальному сечению провода F :

$$d_э = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} \quad (\text{A.1})$$

где $d_э$ — эквивалентный диаметр контактного провода, мм; F — номинальное сечение контактного провода, мм². Полученные значения используются далее при формировании табличной базы для проводов МФ-85, МФ-100, МФ-120 и МФ-150.

Таблица А.1 — Эквивалентные диаметры рассматриваемых контактных проводов

Марка провода	Номинальное сечение F , мм ²	Эквивалентный диаметр $d_э$, мм
МФ-85	85	10,40
МФ-100	100	11,28
МФ-120	120	12,36
МФ-150	150	13,82

Для формирования таблиц прироста линейной массы отложений принята линейная инженерная оценка по эквивалентному диаметру провода. При этом сначала определяется масса единичного слоя отложений толщиной 1 мм, а

затем полученное значение масштабируется по принятой толщине слоя h . Такая форма удобна для построения расчётных таблиц и номограмм, поскольку обеспечивает прямое соответствие между толщиной отложений и величиной Δm .

$$\Delta m_1 = \rho \cdot \pi \cdot (d_3 + 1) \cdot 10^{-3} \quad (\text{A.2})$$

где Δm_1 — прирост линейной массы при образовании единичного слоя толщиной 1 мм, г/м; ρ — расчётная плотность отложений, кг/м³; d_3 — эквивалентный диаметр провода, мм. Величина $(d_3 + 1)$ соответствует среднему диаметру единичного кольцевого слоя, принятого для табличной оценки.

$$\Delta m = \Delta m_1 \cdot h \quad (\text{A.3})$$

где Δm — прирост линейной массы отложений, г/м; h — толщина слоя отложений, мм. В расчётах рассмотрены толщины 1, 2, 5 и 10 мм, что позволяет охватить как начальное образование отложений, так и более выраженное увеличение массы провода.

Переход от прироста линейной массы к добавочной весовой нагрузке на контролируемый участок выполняется по выражению

$$\Delta G = \frac{\Delta m}{1000} \cdot L \cdot g \quad (\text{A.4})$$

где ΔG — добавочная весовая нагрузка от гололёдно-изморозевых отложений, Н; Δm — прирост линейной массы, г/м; L — расчётная длина контролируемого участка, м; g — ускорение свободного падения, м/с². В исходной расчётной базе принято $L = 700$ м.

Таблица А.2 — Прирост линейной массы контактного провода при образовании отложений: изморозь, до 200 кг/м³

Марка провода	Эквивалентный диаметр, мм	1 мм	2 мм	5 мм	10 мм
МФ-85	10,40	7,17	14,33	35,83	71,67
МФ-100	11,28	7,72	15,44	38,61	77,22
МФ-120	12,36	8,39	16,79	41,98	83,96
МФ-150	13,82	9,31	18,63	45,56	93,13

Таблица А.3 — Прирост линейной массы контактного провода при образовании отложений: смешанные ГИО, 200–600 кг/м³

Марка провода	Эквивалентный диаметр, мм	1 мм	2 мм	5 мм	10 мм
МФ-85	10,40	14,33	28,67	89,58	179,17
МФ-100	11,28	15,44	30,89	96,78	193,56
МФ-120	12,36	16,79	33,58	104,95	209,90
МФ-150	13,82	18,63	37,25	116,31	232,62

Таблица А.4 — Прирост линейной массы контактного провода при образовании отложений: мокрый снег, до 500 кг/м³

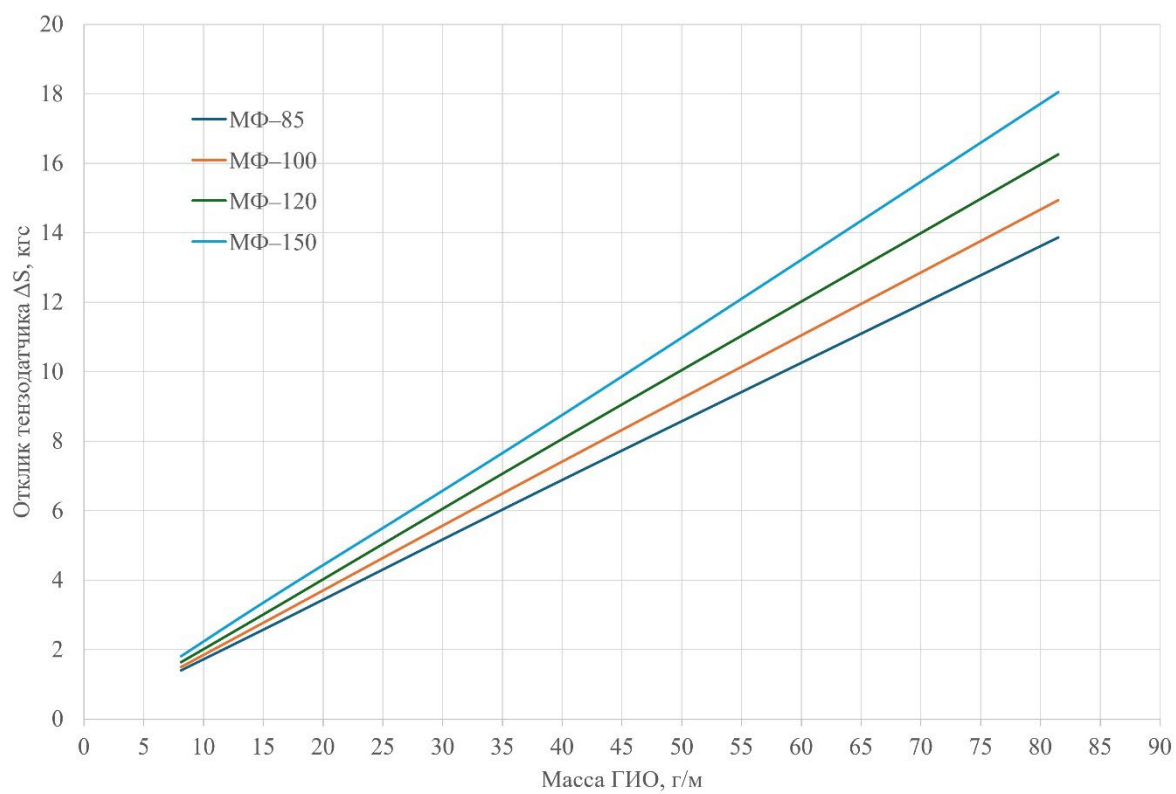
Марка провода	Эквивалентный диаметр, мм	1 мм	2 мм	5 мм	10 мм
МФ-85	10,40	17,93	35,86	89,65	179,30
МФ-100	11,28	19,30	38,60	96,50	193,00
МФ-120	12,36	20,98	41,96	104,90	209,80
МФ-150	13,82	23,28	46,56	116,40	232,80

Таблица А.5 — Прирост линейной массы контактного провода при образовании отложений: гололёд, от 600 кг/м³

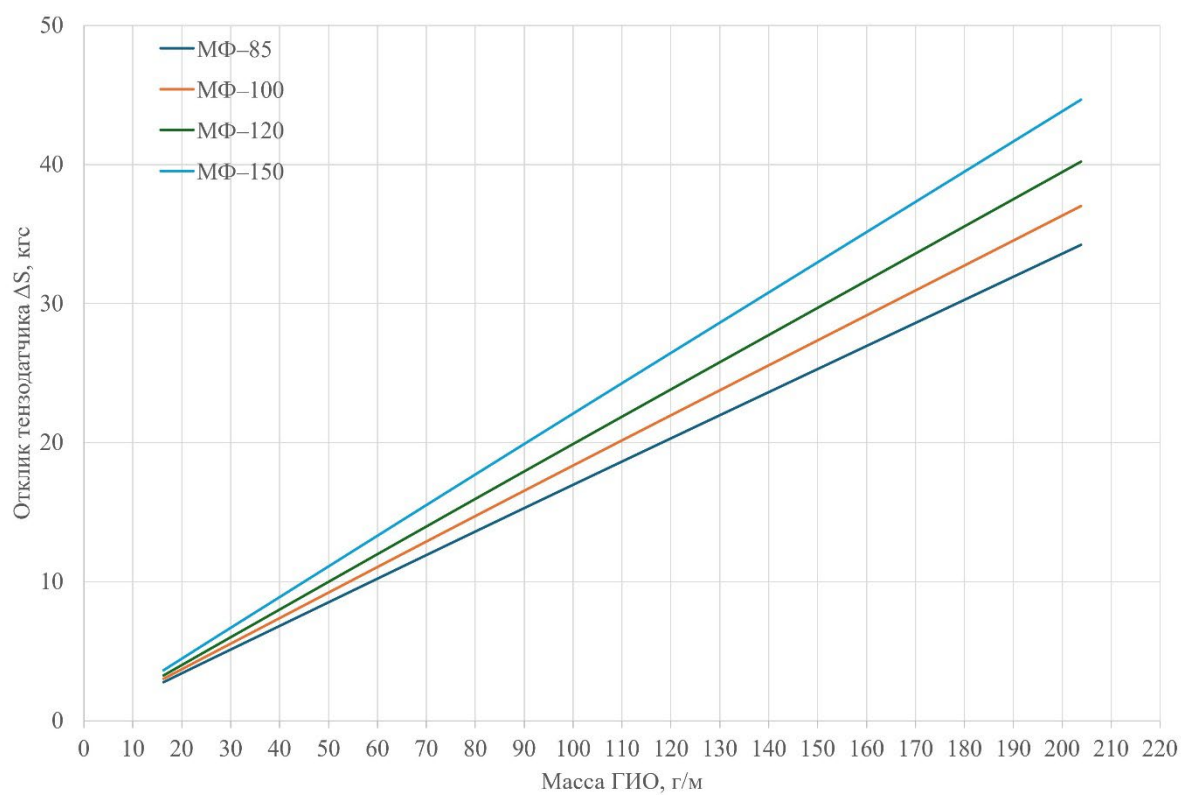
Марка провода	Эквивалентный диаметр, мм	1 мм	2 мм	5 мм	10 мм
МФ-85	10,40	21,52	43,04	107,60	215,20
МФ-100	11,28	23,16	46,32	115,80	231,60
МФ-120	12,36	25,18	50,36	125,90	251,80
МФ-150	13,82	27,94	55,88	139,70	279,40

Примечание — табличная база может применяться также для контактных проводов аналогичного номинального сечения после уточнения эквивалентного диаметра и принятой расчётной плотности отложений. При использовании данных в расчётных зависимостях АСКВП значения Δm переводятся в добавочную весовую нагрузку ΔG по формуле (А.4).

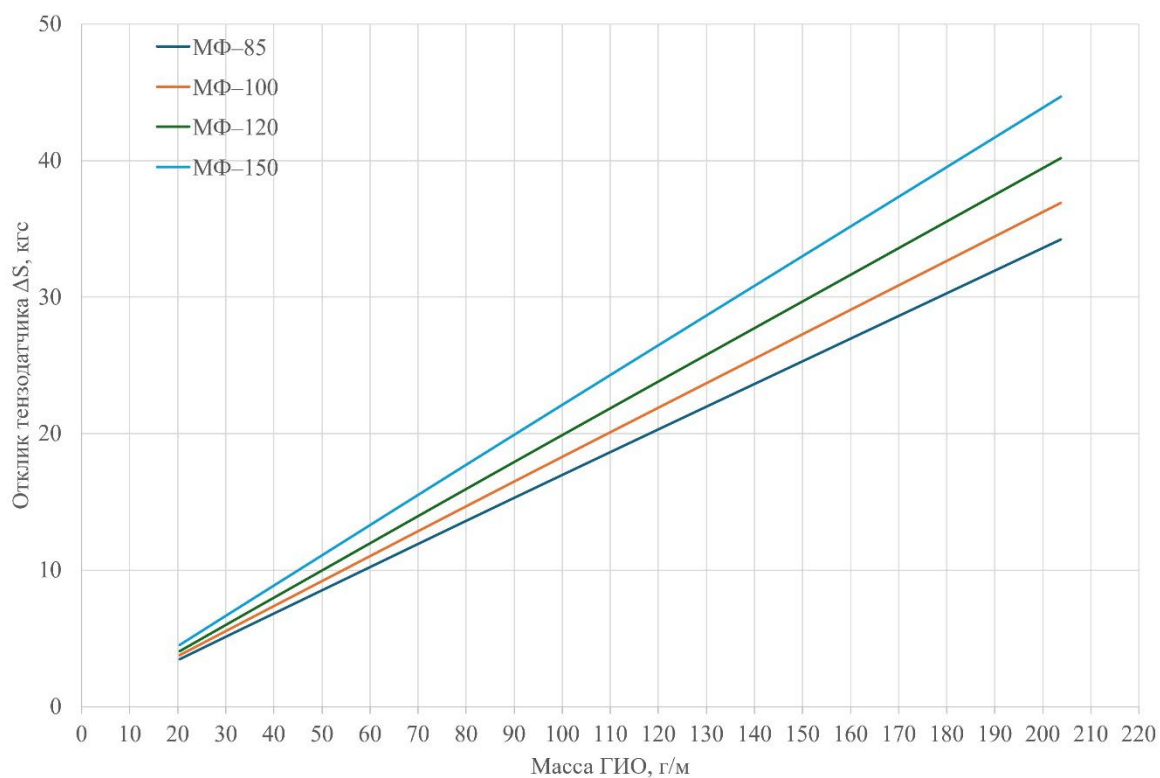
Расчётные номограммы для определения добавочной нагрузки от
гололёдно-изморозевых отложений в компенсирующих устройствах
контактной подвески



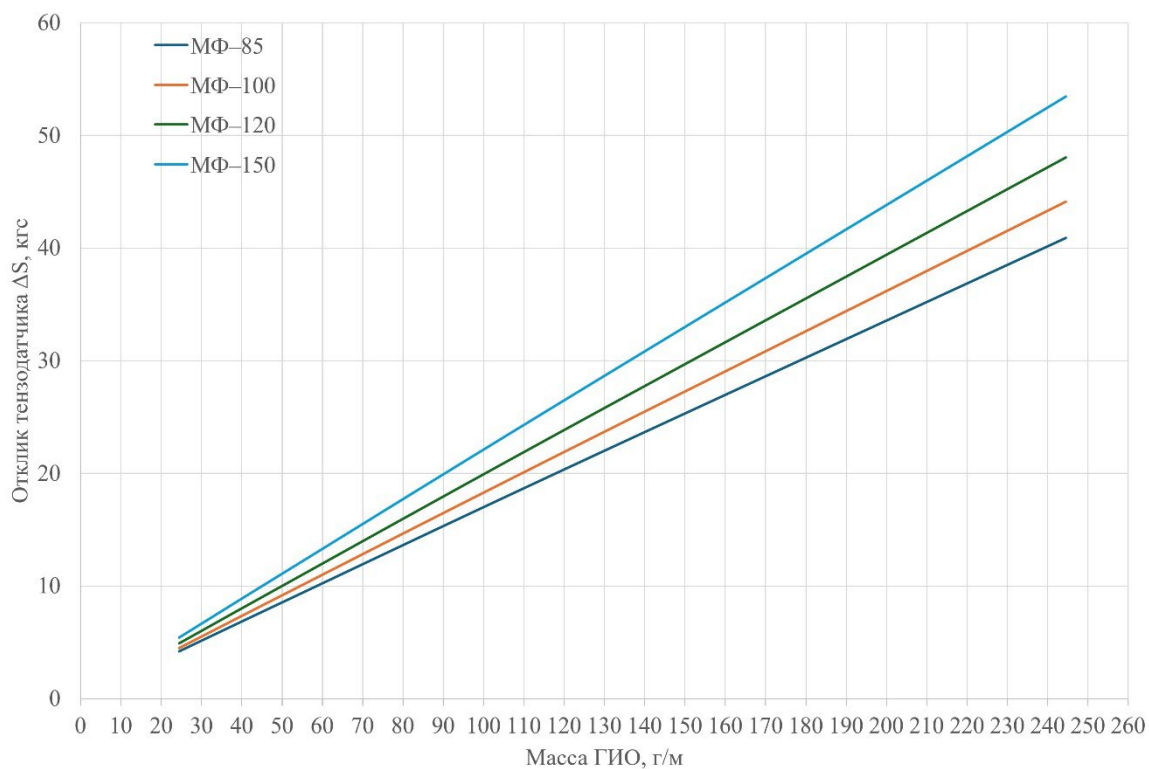
а)



б)

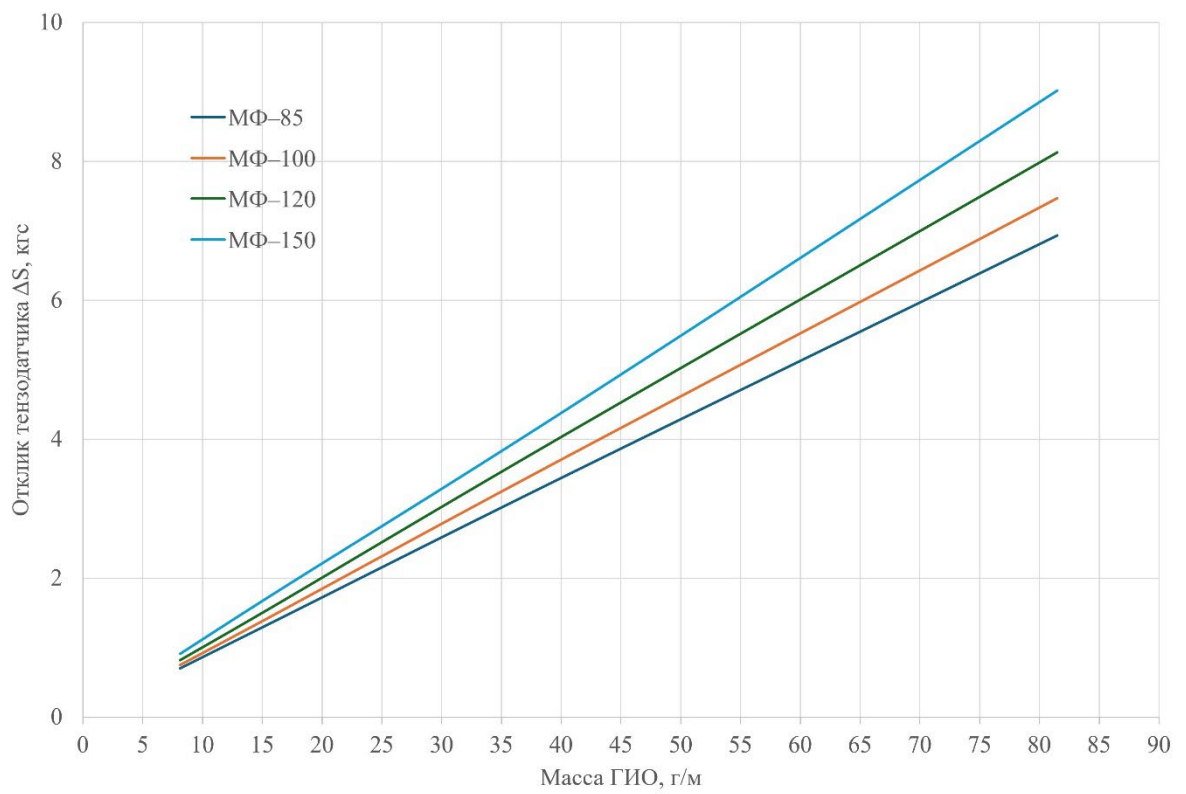


в)

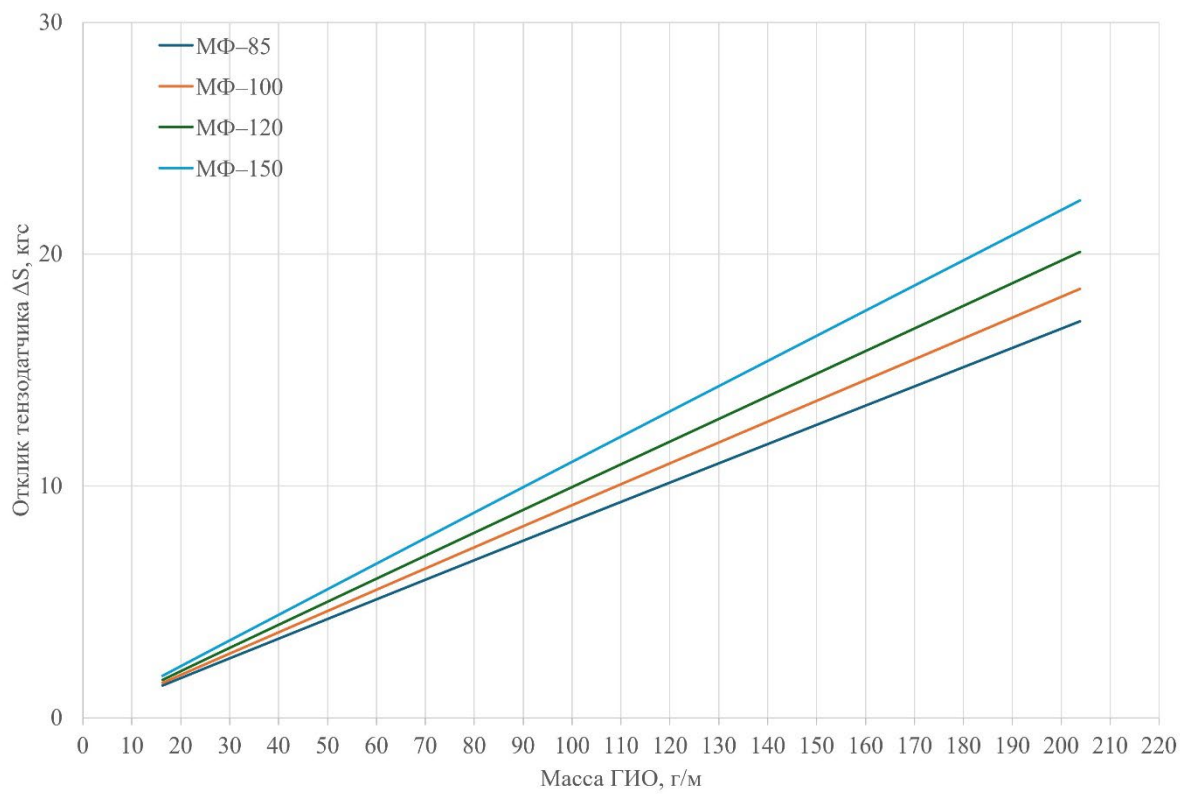


б)

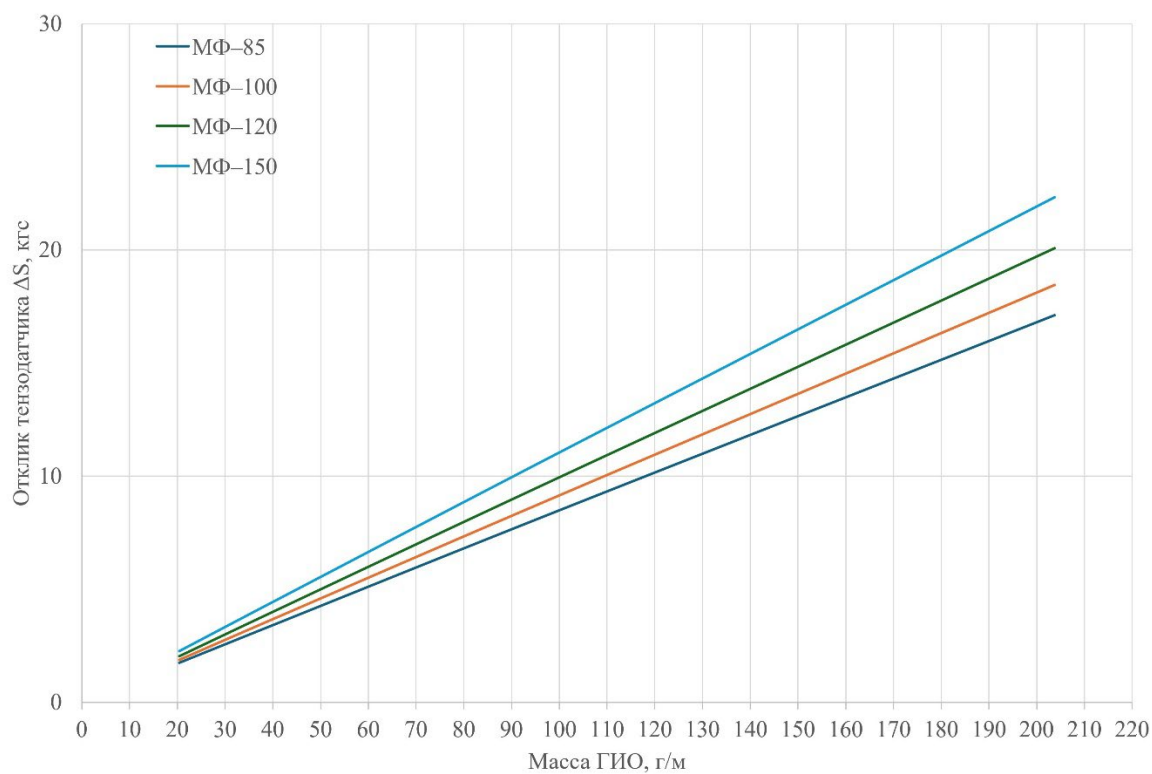
Рисунок Б.1 — Номограммы определения добавочной нагрузки от гололёдно-изморозевых отложений для двухблочного компенсирующего устройства: а — изморозь; б — смешанные ГИО; в — мокрый снег; г — гололёд



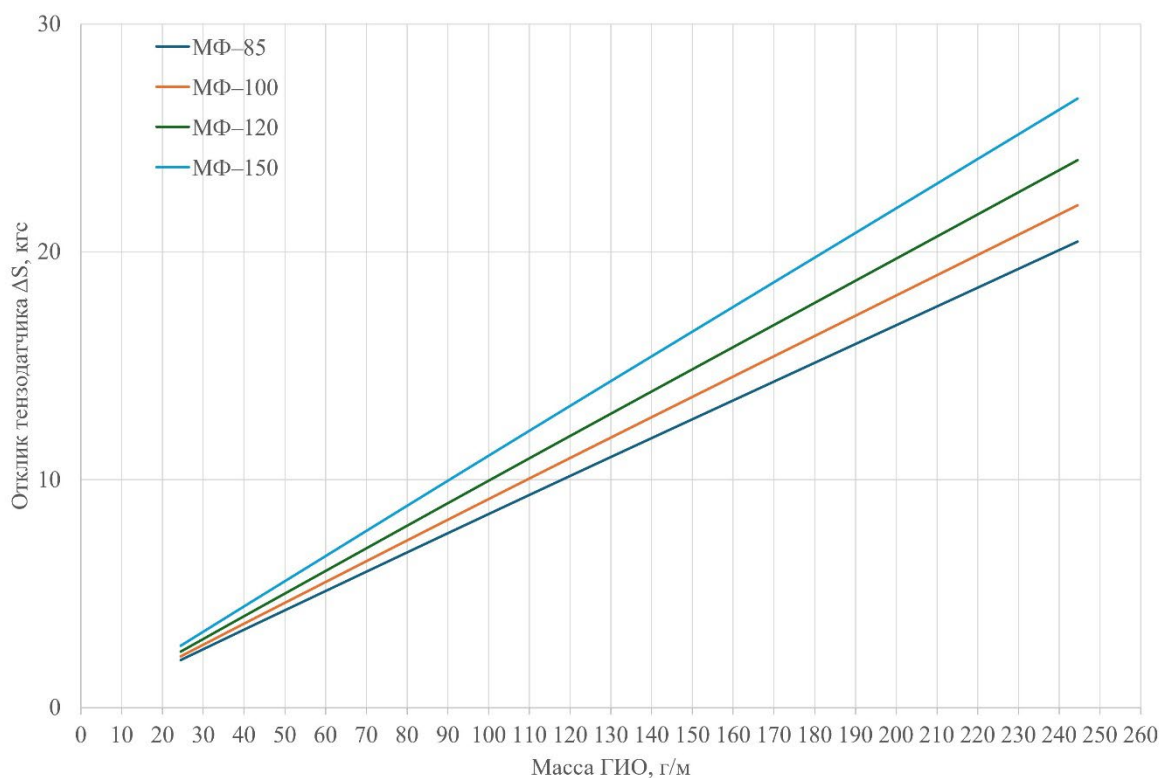
а)



б)

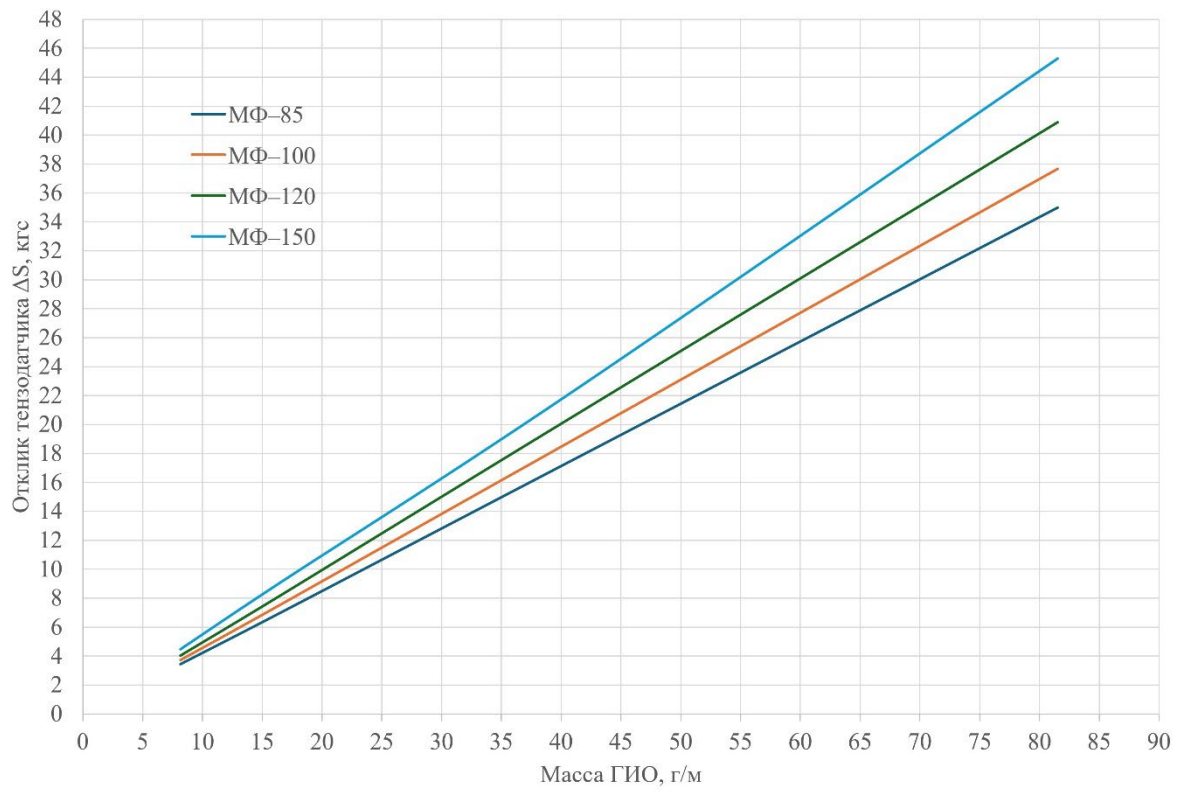


в)

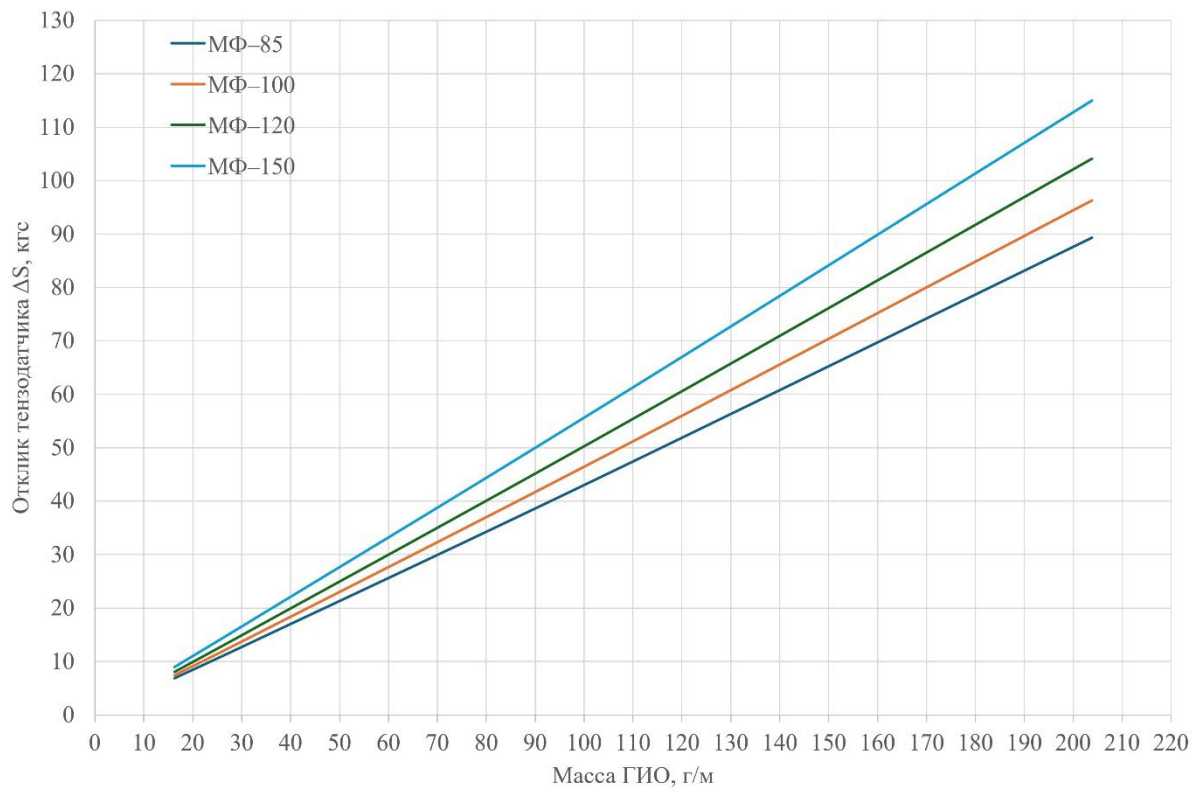


г)

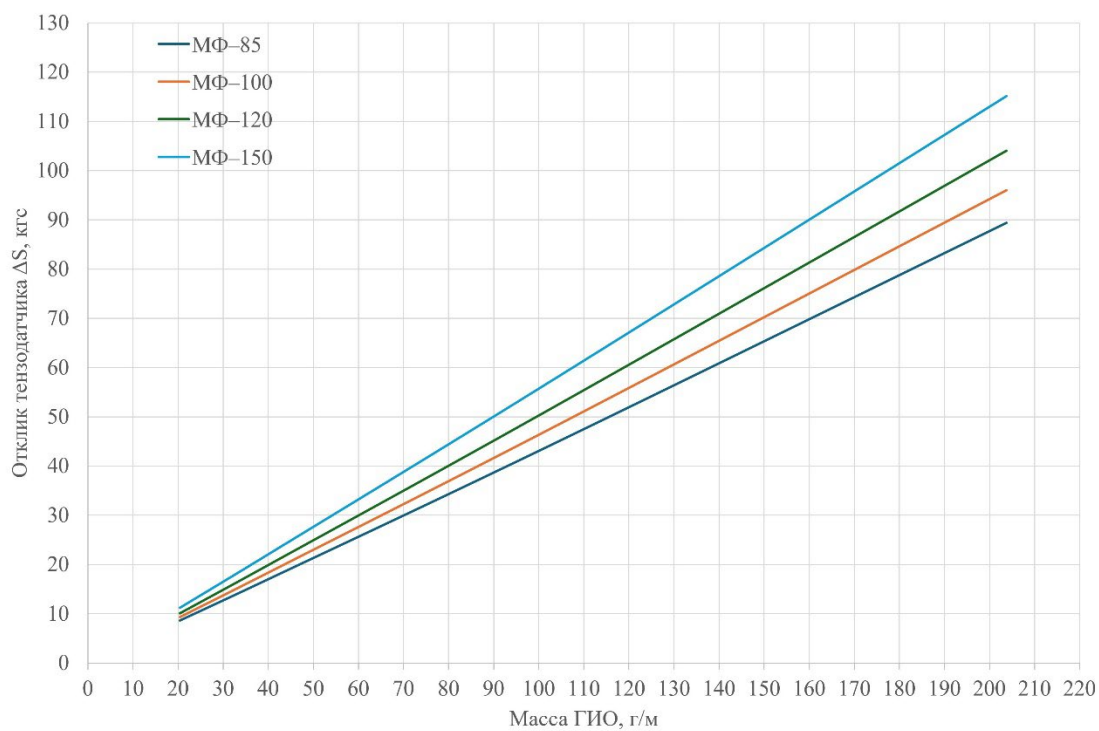
Рисунок Б.2 — Номограммы определения добавочной нагрузки от гололёдно-изморозевых отложений для трёхблочного компенсирующего устройства: а — изморозь; б — смешанные ГИО; в — мокрый снег; г — гололёд



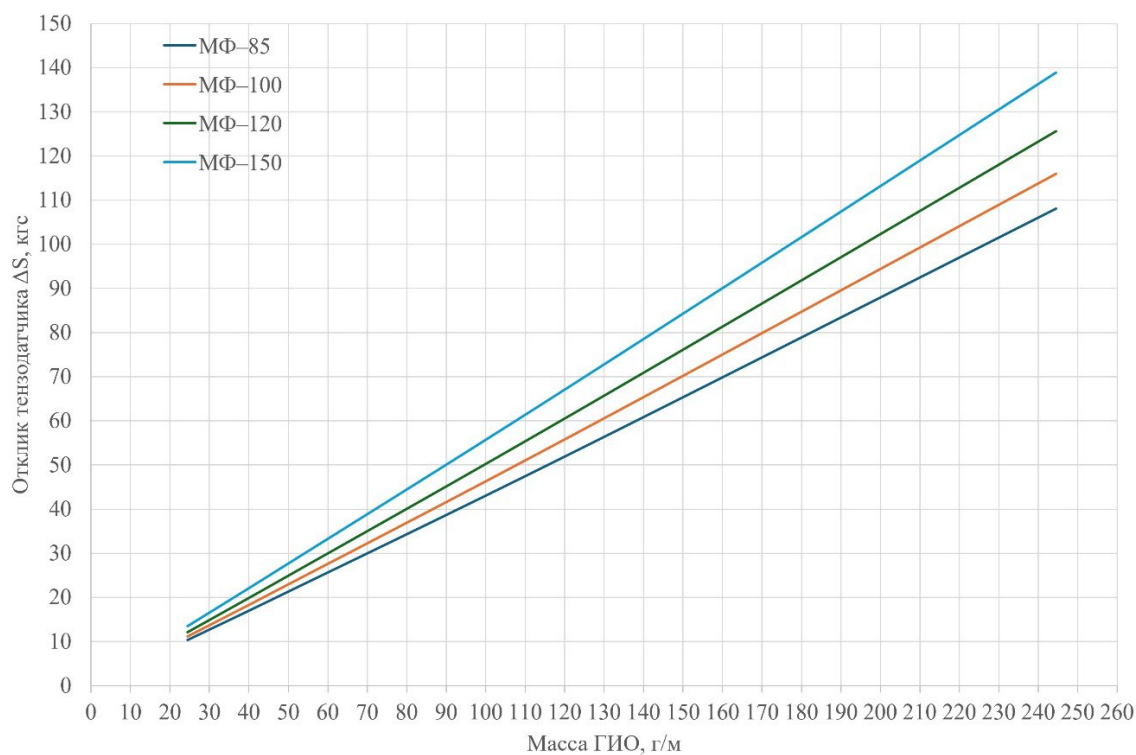
а)



б)



в)



г)

Рисунок Б.3 — Номограммы определения добавочной нагрузки от гололёдно-изморозевых отложений для блочно-полиспастного компенсирующего устройства: а — изморозь; б — смешанные ГИО; в — мокрый снег; г — гололёд

Документ, подтверждающий новизну технических разработок
Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2823373

Автоматизированная система контроля веса проводов
контактной сети железной дорогиПатентообладатель: *Осипов Владимир Александрович (RU)*Авторы: *Осипов Владимир Александрович (RU), Черных
Владимир Николаевич (RU), Черных Николай
Владимирович (RU)*

Заявка № 2024103146

Приоритет изобретения 08 февраля 2024 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 22 июля 2024 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 08 февраля 2044 г.*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164ba96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024*Ю.С. Зубов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 823 373**⁽¹³⁾ **C1**
(51) МПК
B60M 1/12 (2006.01)
B60M 1/26 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B60M 1/12 (2024.01); B60M 1/26 (2024.01)

(21)(22) Заявка: 2024103146, 08.02.2024 (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 08.02.2024 Дата регистрации: 22.07.2024 Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 08.02.2024 (45) Опубликовано: 22.07.2024 Бюл. № 21 Адрес для переписки: 344029, г. Ростов-на-Дону, пр-кт Сельмаш, 12, кв. 129, Осипов Владимир Александрович	(72) Автор(ы): Осипов Владимир Александрович (RU), Черных Владимир Николаевич (RU), Черных Николай Владимирович (RU) (73) Патентообладатель(и): Осипов Владимир Александрович (RU) (56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2681777 C1, 12.03.2019. RU 2631891 C1, 28.09.2017. RU 2701887 C1, 02.10.2019. WO 2011144267 A2, 24.11.2011.
---	--

(54) Автоматизированная система контроля веса проводов контактной сети железной дороги

(57) Реферат:

Изобретение относится к мониторингу состояния контактной сети железнодорожного транспорта. Автоматизированная система контроля веса проводов (АСКВП) компенсированной контактной подвески железной дороги содержит тензометрические датчики для несущего троса для контактного провода, блоки сбора и передачи информации и центральный блок сбора информации. Тензометрический датчик для несущего троса стационарно закреплен между штангой для крепления неподвижного ролика блоков грузокompенсирующих устройств несущего троса и самим неподвижным роликом и подключен к первому блоку сбора и передачи информации. Тензометрический датчик для контактного

провода стационарно закреплен между штангой для крепления неподвижного ролика блоков грузокompенсирующих устройств контактного провода и самим неподвижным роликом и подключен ко второму блоку сбора и передачи информации. Блоки сбора и передачи информации размещены на опоре контактной сети и содержат автономный источник питания, микропроцессорное устройство и устройство радиосвязи с центральным блоком сбора информации, расположенным на диспетчерском пункте. Технический результат изобретения заключается в возможности измерения веса компенсированной контактной подвески с целью определения факта гололедообразования на проводах и тросе контактной подвески. 1 ил.

Акты внедрения результатов диссертационного исследования

АКТ

**о практической значимости результатов диссертационной работы
«Совершенствование автоматизированной системы контроля веса
проводов контактной сети электрифицированных железных дорог» на
соискание учёной степени кандидата технических наук**

Черных Владимира Николаевича

Комиссия, рассмотрев результаты диссертационной работы В. Н. Черных, составила настоящий акт о том, что автором разработаны практические рекомендации по применению автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети, позволяющие:

Повысить своевременность обнаружения признаков гололёдообразования на малодеятельных участках электрифицированных железных дорог за счёт постоянной регистрации изменения усилия в выбранной точке компенсирующего устройства контактной сети.

Оценивать изменение нагрузочного состояния проводов и тросов контактной подвески на основании данных тензометрического контроля и расчётных зависимостей, учитывающих тип применяемого компенсирующего устройства.

Обеспечить эксплуатационный персонал дополнительной информацией о появлении устойчивого изменения нагрузочного состояния контактной подвески для принятия решений о проведении осмотра участка и необходимых противогололёдных мероприятий.

Результаты научных исследований имеют практическую значимость для повышения информационной обеспеченности эксплуатационного персонала, совершенствования контроля состояния контактной сети и снижения вероятности несвоевременного выявления гололёдно-изморозевых отложений на участках электрифицированных железных дорог.

Начальник Ростовской
дистанции электроснабжения



Н.С.Градов



ИНН 6165000652 ОКПО 12142604
ОКОНХ 95120, 95400
344038, г. Ростов-на-Дону, пр. Ленина, 44/13
ж.д. тел./факс (0950-25) 5-89-62,
тел. 8(800)100-40-19,
+7 (863)272-87-19
факс +7(863) 272-87-91
Почта Интернет: sia@ugpa.ru
Почта Интранет: Sia-nts@skzd.rzd

от 05.08.2026г.

АКТ

**о практической значимости результатов диссертационной работы
«Совершенствование автоматизированной системы контроля веса проводов
контактной сети электрифицированных железных дорог»
на соискание учёной степени кандидата технических наук
Черных Владимира Николаевича**

Комиссия, рассмотрев результаты диссертационной работы В. Н. Черных, составила настоящий акт о том, что разработанные автором технические и методические решения позволяют:

1. Осуществлять обоснованный выбор места размещения тензометрического датчика в зоне компенсирующего устройства без установки дополнительного оборудования на рабочую часть контактного провода и нарушения условий токосъёма.
2. Использовать разработанные диагностические модели и практические зависимости для определения ожидаемого приращения усилия при изменении дополнительной вертикальной нагрузки на провода и тросы контактной подвески для различных типов компенсирующих устройств.
3. Применять предложенные структуру измерительного комплекса и алгоритмы регистрации, первичной обработки, фильтрации, калибровки и контроля достоверности показаний тензометрического датчика при разработке технических средств мониторинга нагрузочного состояния контактной сети.
4. Использовать разработанную методику и результаты проверки функционального макета измерительного узла в качестве основы для дальнейшего проектирования, опытной проверки и совершенствования автоматизированной системы контроля веса проводов контактной сети.

Исп. Андрияшин М.А.
(863)272-87-93(доб.4620)

5. Результаты диссертационной работы имеют практическую значимость для разработки и совершенствования средств технической диагностики контактной сети, создания измерительных комплексов тензометрического контроля и подготовки технических решений для опытного применения автоматизированной системы контроля веса проводов на электрифицированных железных дорогах.

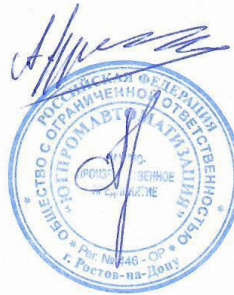
Комиссия в составе:

Директор

Заместитель начальника
Отдела Т

А.Е. Федорчук

М.А. Андрюшин



Исп. Андрюшин М.А.
(863)272-87-93(доб.4620)