

УДК 621.331:621.311

Развитие технологии борьбы с гололедом на контактной сети железных дорог

Ли Июань, И. П. Викулов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ли Июань, Викулов И. П. Развитие технологии борьбы с гололедом на контактной сети железных дорог // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 183–200. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-183-200

Аннотация

Цель: Проанализировать современные технологии борьбы с обледенением контактной сети железных дорог, сосредоточив внимание на развитии и применении методов плавки гололеда, с особым акцентом на опыт Китая. Выявить ключевые достижения стран — лидеров в данной области, проследить эволюцию технологий, провести сравнительный анализ применяемых практик в России, Китае и других странах, а также определить их преимущества и недостатки. **Методы:** Исследование основывается на анализе актуальной научной литературы и применении комплексного подхода к изучению технологий борьбы с обледенением контактной сети железных дорог. Сравнительный анализ широко используемых методов борьбы с обледенением в различных странах с целью выявления их преимуществ и недостатков, а также оценки перспектив дальнейшего развития технологий. Изучение интеллектуальных систем управления плавкой гололеда с использованием статических генераторов реактивной мощности (SVG) в сочетании с устройствами переключения емкостей и реакторов (TSC/TSR), которые позволяют не только адаптировать параметры системы тягового электроснабжения, но и осуществлять плавку гололеда с учетом изменений погодных условий в реальном времени. **Результаты:** Установлено, что ключевые методы борьбы с обледенением контактной сети, такие как токовый нагрев, использование статических генераторов реактивной мощности (SVG) и интеграция интеллектуальных систем управления, способствуют повышению надежности и энергоэффективности систем. Показано, что внедрение современных инновационных решений позволяет оптимизировать процесс борьбы с обледенением, снижать эксплуатационные затраты и адаптировать технологии к сложным климатическим условиям.

Практическая значимость: Данная статья служит основой для понимания существующих противообледенительных систем железнодорожных контактных сетей. Основное внимание уделено анализу опыта ведущих стран, который может быть использован как справочный материал для совершенствования существующих и разработки новых технологий борьбы с обледенением проводов контактной подвески. Инновационные подходы, описанные в статье, могут быть интегрированы в существующие системы, чтобы повысить их надежность, снизить эксплуатационные затраты и улучшить экологическую устойчивость. На основе представленных данных и графических материалов оцениваются реальные перспективы внедрения современных решений для защиты железнодорожных контактных сетей.

Ключевые слова: Железная дорога, контактная сеть, контактный провод, обледенение, методы борьбы с обледенением.

Введение

Контактная сеть является важной частью электрифицированных железных дорог и представляет собой особый тип линии электропередачи, установленной над железной дорогой. Токосъемник локомотива контактирует с ней, получая

электричество для электровозов. Контактная сеть распределена вдоль железнодорожных путей и продолжает увеличиваться с развитием электрификации железных дорог. Являясь ключевой частью системы тягового электроснабжения, контактная сеть находится на открытом воздухе и подвержена воздействию природно-климатических факторов. В условиях холода и влажности часто происходит обледенение элементов контактной сети, что серьезно влияет на безопасность движения поездов. Обычно на электрифицированных железных дорогах, особенно постоянного тока, за счет нагрева контактных проводов тяговым током обледенение менее вероятно, но в Китае, где высокоскоростные железные дороги электрифицированы переменным током и охватывают множество климатических зон, а также геологических условий, обледенение возможно, особенно когда на значительное время отсутствует движение поездов, а температура колеблется около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при высокой влажности воздуха [1]. Обледенение контактной сети (рис. 1) — это распространенное явление для электрифицированных железных дорог, часто возникающее в начале зимы и весны, представляющее собой угрозу на значительном протяжении контактной сети и одновременно может затрагивать несколько участков железных дорог, что характеризуется большой опасностью и сложностью в устранении последствий. Зимний период в Китае обусловлен холодными воздушными потоками, вызывающими значительное понижение температур и повышение осадков, что способствует обледенению проводов. Если происходит обледенение, оно может распространиться на большую территорию, сильно повлияв на железнодорожные перевозки, даже приводя к их остановке.



Рис. 1. Обледенение контактной сети на ж. д. линиях Китая (Гуйян) [2]

За последние 10 лет экстремальные погодные условия, такие как заморозки и ледяные дожди, действительно нанесли ущерб железнодорожным системам и инфраструктуре в нескольких странах, включая Россию, Китай, США, Японию и Южную Корею [3–6]. В табл. 1 показано влияние экстремальных погодных условий на железные дороги.

ТАБЛИЦА 1. Влияние экстремальных погодных условий на железные дороги

Дата	Страна	Погодные условия	Влияние на железные дороги
Январь 2017 г.	Япония (север Хонсю)	Сильные морозы и снегопады	Обледенение контактных сетей, задержки высокоскоростных поездов Синкансэн
Январь 2019 г.	США	Экстремально холодный воздух	Обледенение рельсов, обледенение проводов, перебои в транспортном сообщении между Чикаго и Нью-Йорком
Январь 2021 г.	Южная Корея	Снегопады и морозы	Обледенение контактных сетей, задержки поездов на ключевых маршрутах
Январь 2021 г.	Китай (Чэнду)	Обледенение контактной сети	Дефекты в работе контактной сети, дуговые разряды, задержки движения поездов
Февраль 2024 г.	Китай (Хубэй)	Ледяной дождь	Обледенение контактной сети, задержки движения поездов
Апрель 2024 г.	Россия	Обледенение контактной сети	Поезда на Финляндском направлении отменены, часть движется с задержками

Поддержание контактной сети свободной от льда является залогом ее безопасной и надежной эксплуатации, способствует снижению затрат на обслуживание как контактной сети, так и устройств токосъема и электрооборудования высокоскоростных поездов.

В настоящее время на электрифицированных железных дорогах для борьбы с обледенением контактной сети применяются следующие методы: механическое воздействие, применение антифризов и противогололедных реагентов, а также термическое плавление льда с помощью больших токов.

Во Франции механический метод борьбы с обледенением, заключающийся в установке специальных устройств на переднем конце пантографа, используется на железнодорожных линиях с рабочей скоростью менее 200 км/ч. Для высокоскоростных железных дорог со скоростью движения свыше 200 км/ч предпочтение отдается термическим системам плавления льда с использованием больших токов. В Германии антиобледенительные составы и противогололедные реагенты наносятся на проводники контактной сети, что эффективно применяется на городском железнодорожном транспорте. Однако на железных дорогах общего пользования чаще используются механические методы борьбы с обледенением [7]. В Японии проводятся экспериментальные исследования технологий термического плавления льда с применением электрического тока. Это обусловлено сложностью изготовления и обслуживания проводов контактной сети, а также рисками перегрева.

В частности, избыточное выделение тепла в проводах контактной подвески может привести к необратимым изменениям их прочностных характеристик.

На обычных линиях железных дорог Китая для борьбы с обледенением контактных проводов обычно используется ручное удаление льда или пантограф с контактным скользящим контактом, изготовленным на основе медно-графитовых материалов. Однако сегодня, с ростом скорости движения и количества высокоскоростных поездов, ручное удаление льда является неэффективным решением и главным способом борьбы с обледенением становится термическое плавление льда. Основным принципом плавления льда заключается в использовании активного сопротивления контактной сети для нагрева. Суть метода состоит в том, что ток определенной величины в течение заданного времени проходит через существующую первичную цепь тягового электроснабжения. Данный метод аналогичен принципу работы систем противообледенения проводов для линий электропередач систем энергоснабжения.

В настоящее время устройства для предотвращения обледенения и плавления льда, которые разрабатываются как в Китае, так и за рубежом, функционируют в автономном режиме, то есть их работа возможна только в отсутствие движения поездов [8]. Однако для современных высокоскоростных железных дорог с увеличивающейся плотностью движения и скоростями свыше 200 км/ч время работы таких устройств слишком короткое и его может быть недостаточно для эффективного удаления льда с контактной сети. Это требует разработки устройств для онлайн-систем противообледенения или плавления льда, работающих в режиме реального времени, которые могут использоваться на высокоскоростных железных дорогах, обеспечивая непрерывную защиту от льда. Дополнительными требованиями к таким системам выступают энергоэффективная работа самих устройств, автоматический контроль за вырабатываемой ими энергией и удаленное диагностирование состояния контактной сети.

Механизм образования гололеда

Механизм образования гололеда на контактной сети железных дорог связан с физическими и атмосферными процессами, происходящими при низких температурах и высокой влажности. Рассмотрим основные аспекты этого явления [9–11]:

1. Условия для образования гололеда

Гололед образуется при совокупности следующих факторов: температура воздуха обычно находится в диапазоне от 0 °С до –5 °С. В этом диапазоне переохлажденные капли воды замерзают при контакте с холодной поверхностью проводов. Высокая влажность увеличивает вероятность образования льда за счет конденсации влаги или осадения переохлажденных капель на проводах. Осадки в виде мокрого снега, переохлажденного дождя или изморози оседают на поверхности проводов и начинают замерзать, образуя ледяной слой. Скорость ветра усиливает

теплообмен между проводами и окружающей средой, снижая их температуру и ускоряя процесс замерзания.

2. Процессы формирования гололеда

Гололед образуется в результате следующих физических процессов.

Осаждение влаги происходит, когда переохлажденные капли воды сталкиваются с поверхностью провода и мгновенно замерзают, образуя ледяной слой. Конденсация водяного пара на холодной поверхности также инициирует процесс образования льда. Теплообмен заключается в том, что провод теряет тепло через теплопроводность, конвекцию и излучение. Если тепловой энергии оказывается недостаточно, поверхность провода охлаждается до температуры, благоприятной для замерзания влаги. Рост льда продолжается за счет налипания новых капель воды или снежных кристаллов, которые замерзают, увеличивая толщину ледяного слоя.

3. Влияние внешних факторов

Образование гололеда на контактной сети зависит от ряда внешних факторов.

Тип контактной сети влияет на вероятность обледенения. На линиях постоянного тока эта вероятность ниже из-за нагрева проводов током нагрузки. На линиях переменного тока обледенение происходит чаще. Материал провода играет значительную роль. Проводники с высокой теплопроводностью, такие как медные, меньше подвержены обледенению по сравнению со стальными. Конструкция контактной сети также влияет на вероятность обледенения. Провода, расположенные в открытой местности, больше подвержены образованию льда, чем те, которые защищены тоннелями или навесами.

4. Контактный тип обледенения

Обледенение можно классифицировать по плотности на дождевую наледь, изморозь, смешанную наледь и снег.

Дождевая наледь образуется, когда переохлажденная вода или вода при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже сталкивается с поверхностью объекта, формируя прозрачный и твердый слой льда. Плотность наледи составляет $0,6\text{--}0,9\text{ г/см}^3$. Эта наледь прочно прикрепляется к поверхности и трудно удаляется. В феврале 2024 года в китайской провинции Хубэй произошел сильный ледяной дождь (рис. 2), который привел к отказу систем токосъема электроподвижного состава высокоскоростных железных дорог и вызвал остановку или задержку движения ряда поездов.

Изморозь подразделяется на кристаллическую и зернистую. Кристаллическая изморозь формируется при конденсации пара и образует рыхлую структуру, которая легко разрушается под воздействием вибрации. Зернистая изморозь образуется, когда переохлажденный пар сталкивается с охлажденной поверхностью, создавая лед с плотностью $0,1\text{--}0,3\text{ г/см}^3$.

Смешанная наледь представляет собой результат попеременного замерзания дождевой наледи и изморози, отличается мягкой структурой и плотностью от $0,2$ до $0,6\text{ г/см}^3$ [13].



Рис. 2. Обледенение контактной сети [12]

Снег на равнинах отличается низкой плотностью и слабой адгезией. Однако в горных регионах снег, проходя через многократные процессы замерзания и таяния, может превратиться в смесь льда и воды, увеличивая свою плотность и массу.

Существующие методы борьбы с обледенением контактной сети

В настоящее время существует большое число методов борьбы с обледенением контактной сети, каждый из которых имеет свои особенности и ограничения. Далее подробно рассмотрены механические, химические и термодинамические методы, а также оценены их преимущества и недостатки.

1. Основные способы механического удаления льда

Ручная очистка льда

Описание: рабочие вручную удаляют лед с проводов с использованием специальных инструментов, таких как скребки, молотки или тросы (рис. 3, а).

Использование вибрационных пантографов

Описание: пантографы с вибрационным механизмом установлены на локомотивы или специальные обслуживающие машины. При контакте с проводами вибрация разрушает лед (рис. 3, б) [15].

Скребки и чистящие устройства

Описание: на провода устанавливаются скребки, которые разрушают и удаляют лед при их движении вдоль контактной сети (рис. 3, в) [16].

Использование очистительных поездов

Специальные поезда с оборудованием для удаления льда. На них могут быть установлены скребки, щетки или системы обдува (рис. 3, г) [17].

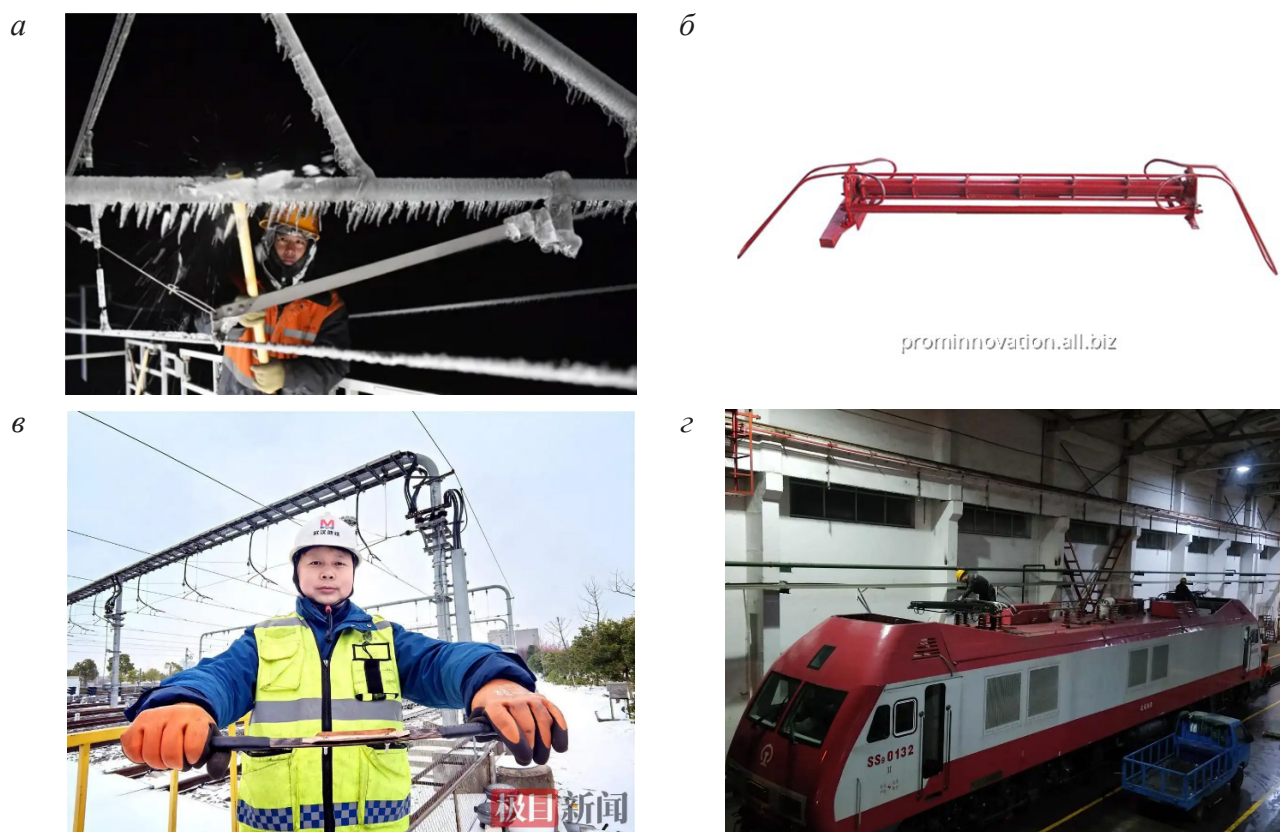


Рис. 3. Основные способы механического удаления льда:

- a* — ручная очистка проводов контактной сети от льда [14];
б — вибропантограф для механической очистки гололеда с контактного провода [15];
в — скребок для удаления льда [16]; *г* — очистительный поезд [17]

В табл. 2 показаны преимущества и недостатки механических методов борьбы с обледенением.

ТАБЛИЦА 2. Преимущества и недостатки механических методов борьбы с обледенением

Преимущества	Недостатки
Простота реализации. Большинство методов, таких как ручное удаление льда или использование скребковых устройств, не требуют сложного оборудования	Высокие трудозатраты. Ручное удаление льда требует значительных усилий и задействования рабочей силы, особенно на обширных участках
Оперативность. Механические методы позволяют быстро реагировать на уже образовавшееся обледенение	Риск повреждения. Использование скребковых устройств или вибрационных механизмов может повредить провода или другие элементы контактной сети
Универсальность. Эти методы применимы в различных климатических условиях и для разных типов контактной сети	Ограниченная эффективность. При толстом или плотном слое наледи механические методы становятся менее результативными
Возможность автоматизации. Современные роботизированные устройства и вибрационные механизмы делают процесс удаления льда более технологичным	Зависимость от погодных условий. Сильный ветер, снегопад или другие неблагоприятные факторы могут осложнять реализацию механических методов

Механические методы остаются важным инструментом борьбы с обледенением благодаря своей универсальности и оперативности. Однако их эффективность можно повысить за счет интеграции с другими подходами, такими как термические или химические методы. Это позволит минимизировать их недостатки и улучшить надежность работы контактной сети.

2. Химические методы

Химические методы борьбы с обледенением включают использование химических составов, которые предотвращают образование льда на контактной сети или способствуют его удалению. Основными средствами являются антифризы и противогололедные реагенты.

Антифризы представляют собой химические составы, предотвращающие образование льда на проводах контактной сети за счет снижения температуры замерзания воды. Основными типами антифризов являются водные растворы этиленгликоля, пропиленгликоля и солей (например, хлорида кальция). Их использование позволяет создавать защитный слой на поверхности проводов, который препятствует образованию льда. Однако такие вещества требуют регулярного нанесения и могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Применение антифризов целесообразно в качестве профилактической меры в условиях умеренного климата.

Противогололедные реагенты предназначены для удаления уже образовавшегося льда с контактной сети. Вещества, такие как хлориды натрия или кальция, нарушают структуру льда, облегчая его механическое удаление. Органические соединения (ацетаты, формиаты) используются для минимизации коррозионного воздействия на элементы инфраструктуры. Противогололедные реагенты эффективны при экстремально низких температурах, но их применение требует учета экологических и эксплуатационных факторов, особенно вблизи водоемов.

На ж. д. линиях России с 2019 г. применяется устройство для нанесения защитного покрытия на контактный провод («Колибри»), представленное на рис. 4 [18].

В Германии для борьбы с обледенением контактной сети на городских железнодорожных линиях используются противогололедные реагенты с добавлением ингибиторов коррозии. Эти составы обеспечивают эффективное удаление льда с проводов, предотвращая повреждение металлических элементов инфраструктуры. Ингибиторы коррозии минимизируют воздействие химических веществ на контактную сеть, что особенно важно для продления срока службы оборудования и поддержания надежности работы в условиях регулярного воздействия реагентов. Такой подход демонстрирует баланс между эффективностью удаления льда и сохранением эксплуатационных характеристик контактной сети.

Преимущество рассматриваемых химических методов борьбы с обледенением контактного провода заключается в предотвращении образования гололеда и отсутствии механических воздействий на контактный провод. Основными



Рис. 4. Устройство «Колибри» наносит антигололедное покрытие [18]

недостатками являются: экологическое воздействие на прилегающие к железной дороге территории, относительно высокие трудозатраты на обработку, высокая стоимость химических реагентов и необходимость наличия «окон» в графике движения поездов.

3. Тепловые методы

Тепловые методы основаны на нагреве контактной сети с целью предотвращения образования льда или удаления уже существующего обледенения. Основным принципом является повышение температуры проводов выше точки замерзания воды, что достигается различными способами.

Пропускание сильного электрического тока через провода является одним из наиболее эффективных методов. Этот способ позволяет быстро нагревать контактную сеть и удалять лед. Однако он сопровождается высокими энергозатратами и риском перегрева проводов, что требует тщательного контроля.

Плавка гололеда с использованием силового электрического тока (рис. 5): нагрев проводов достигается за счет искусственного повышения силы тока, что позволяет достичь температуры, достаточной для расплавления льда с нормативной толщиной стенки. Этот метод особенно эффективен при условии отключения потребителей от сети и замыкания проводов накоротко.

Посекционный подогрев контактных проводов: применяется метод нагрева небольших участков проводов до температуры около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы предотвратить образование наледи. Реализация метода включает использование мобильной установки, которая движется вдоль контактной сети, подключается к проводам через управляемый пантограф и пропускает электрический ток.

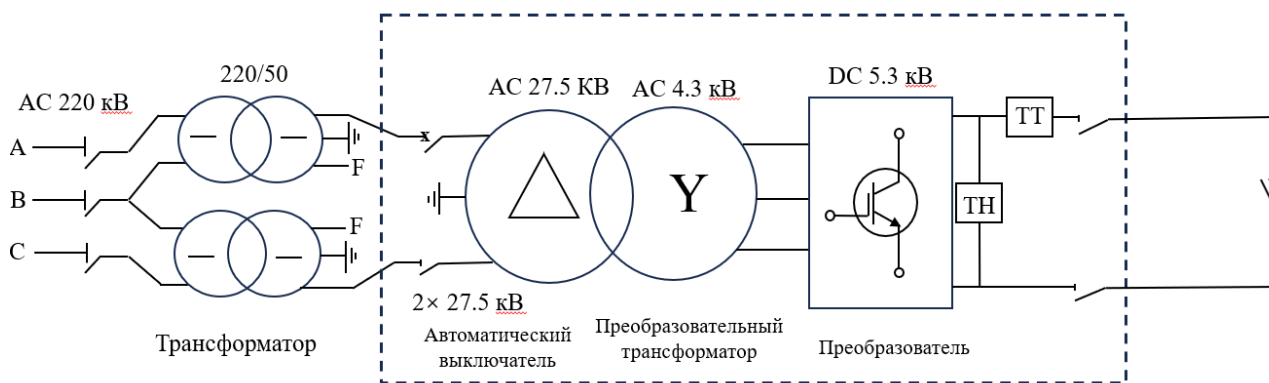


Рис. 5. Принципиальная схема технологии плавка гололеда постоянным током

Преимущества: быстрое удаление льда; возможность интеграции в существующую инфраструктуру контактной сети; универсальность применения на различных типах линий.

Недостатки: высокие энергозатраты; необходимость временного отключения потребителей; риск перегрева проводов и их повреждения.

Таким образом, каждый из методов имеет свои сильные и слабые стороны. Выбор конкретного подхода должен основываться на условиях эксплуатации, требуемом уровне эффективности и возможностях для технического обслуживания.

Интегрированная система плавки льда с использованием статического генератора реактивной мощности

Дальнейшее совершенствование методов борьбы с гололедом и обледенением контактной сети в условиях экстремальных климатических изменений требует применения высокоэффективных и энергоэффективных технологий.

Одним из современных подходов к решению данной проблемы является использование разрабатываемого в Китае метода на базе применения статического генератора реактивной мощности (SVG), который основан на способности SVG генерировать и регулировать реактивную мощность для поддержания температуры проводов выше точки замерзания воды. Интеграция SVG с устройствами переключения емкости (TSC) и реакторов (TSR) позволяет создать интеллектуальную систему, адаптирующуюся к изменениям погодных условий в режиме реального времени [19].

Статический генератор реактивной мощности (рис. 6) представляет собой устройство, способное управлять потоком реактивной мощности в реальном времени. Его применение в системах борьбы с обледенением контактной сети связано с высокой скоростью реакции, энергоэффективностью и возможностью точного контроля параметров нагрева (рис. 7).

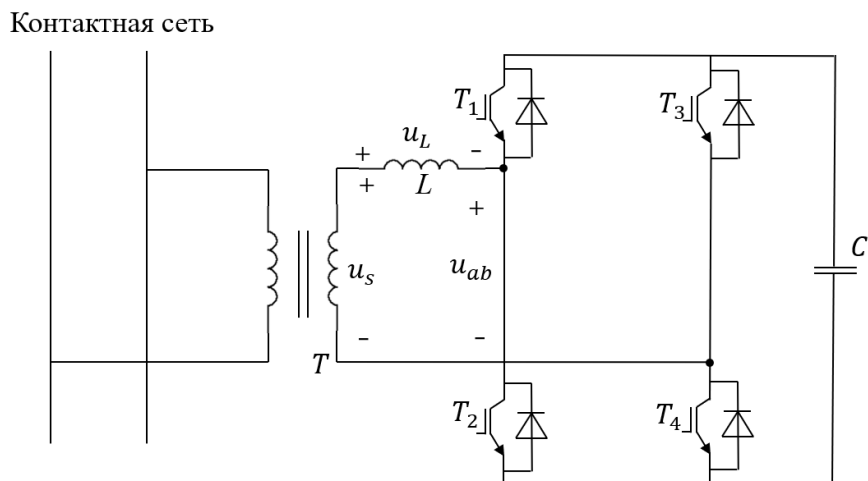


Рис. 6. Схемы статического генератора реактивной мощности SVG

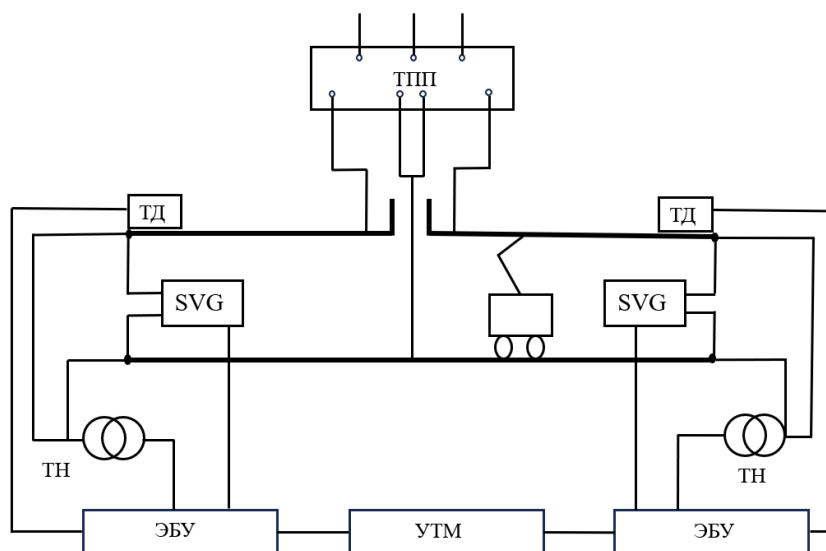


Рис. 7. Схема включения SVG генератора в тяговую сеть:

ТП — тяговая подстанция; ТН — трансформатор напряжения; ТД — термодатчик; ЭБУ — электронный блок управления; УТМ — устройство телемеханики; SVG — статический генератор реактивной мощности

Принцип работы SVG заключается в следующем. Во-первых, он генерирует реактивную мощность, которая может быть как емкостной, так и индуктивной, в зависимости от требуемой компенсации для обеспечения качества электрической энергии в электротяговой сети. Во-вторых, SVG активно регулирует напряжение в электрической сети, уменьшая колебания. Это достигается посредством компенсации изменений реактивной мощности. В-третьих, включение и выключение конденсаторных или индуктивных элементов в SVG позволяет эффективно компенсировать реактивную мощность в соответствии с текущими потребностями сети. Наконец, SVG минимизирует гармонические искажения и фильтрует их, улучшая качество электроэнергии в сети.

Основные этапы борьбы с обледенением с использованием SVG

1. Генерация реактивной мощности

SVG подключается к контактной сети и генерирует реактивную мощность, которая используется для нагрева проводов. Реактивный ток создает тепловой эффект, что приводит к увеличению температуры проводов. Это позволяет предотвратить образование льда или удалить уже существующую наледь.

2. Адаптивное управление мощностью

SVG способен быстро регулировать уровень требуемой реактивной мощности в зависимости от текущих погодных условий, таких как температура, влажность и скорость ветра. Благодаря этому подходу обеспечивается минимизация энергозатрат и предотвращение избыточного нагрева проводов, что повышает общую эффективность системы.

3. Система трехуровневого управления

Технология управления SVG основана на трех уровнях:

1) координационный уровень: на основе данных о состоянии сети и погодных условиях определяет необходимый объем мощности и распределяет нагрузку между SVG, переключателями емкости (TSC) и реакторами (TSR);

2) управляющий уровень: контролирует работу вспомогательных устройств, обеспечивая стабильность системы и корректную подачу мощности;

3) исполнительный уровень: регулирует электрические параметры (сила тока, напряжение) непосредственно в контактной сети, обеспечивая точный нагрев проводов;

4) мониторинг и диагностика.

SVG оснащен системой датчиков, которые в реальном времени отслеживают ключевые параметры контактной сети, такие как наличие льда и температура проводов. Эти данные поступают в управляющую систему, которая оперативно корректирует режимы нагрева в зависимости от текущих условий. Это позволяет повысить надежность работы и избежать ненужных энергозатрат.

Особенности технологии SVG [20]:

1. Высокая точность управления: SVG позволяет регулировать параметры нагрева с минимальными отклонениями, предотвращая перегрев проводов.

2. Интеграция с интеллектуальными системами: устройства могут работать совместно с метеорологическими системами, автоматически включая нагрев при неблагоприятных условиях.

3. Энергоэффективность: в плавке гололеда участвуют только нужные участки сети, что снижает общий уровень потребляемой энергии.

4. Скорость реакции: SVG способен мгновенно включать или выключать подачу мощности, что важно при внезапных изменениях погодных условий.

Однако существует несколько нерешенных проблем, мешающих внедрению такого метода на всей сети высокоскоростных ж. д. Китая. Среди основных проблем можно выделить следующие.

Высокая стоимость оборудования и его внедрения. Интеграция SVG требует значительных капитальных вложений, включая закупку самого оборудования, его установку и наладку. В условиях протяженной сети железных дорог Китая эти расходы становятся особенно ощутимыми, что затрудняет повсеместное внедрение технологии.

Сложность интеграции с существующей инфраструктурой: китайская железнодорожная сеть включает участки с различными технологиями реализации системы тягового энергоснабжения, и далеко не все из них готовы к внедрению SVG без серьезной модернизации. Например, неоднородные по сечению участки контактной сети не обеспечат эффективную работу SVG для плавки гололеда, что потребует дополнительных вложений в ее модернизацию.

Влияние на электрическую сеть: сеть высокоскоростных железных дорог предъявляет чрезвычайно высокие требования к надежности системы электроснабжения, использование SVG приводит к изменению характеристик СТЭ (системы тягового электроснабжения), что может негативно сказаться на других элементах системы электроснабжения. В частности, неравномерное распределение реактивной мощности может вызвать дополнительные потери энергии и снизить стабильность работы железнодорожной энергосистемы в целом.

Проблемы совместимости с другими системами борьбы с обледенением: на китайских железных дорогах уже применяются различные технологии борьбы с наледью, включая контактные и бесконтактные методы нагрева, химические реагенты и механические очистители. Внедрение SVG требует тщательной координации с этими системами, чтобы избежать дублирования функций и неоправданного роста затрат.

Недостаточная точность мониторинга и прогнозирования обледенения: высокоскоростные железнодорожные линии имеют большую протяженность и сложные природные условия, из-за чего существующие технологии мониторинга имеют невысокую точность прогнозирования местоположения и степени обледенения элементов контактной подвески.

Заключение

В статье рассмотрены современные технологии борьбы с обледенением контактной сети железных дорог, включая механические, химические и термические методы. Особое внимание уделено использованию статических генераторов реактивной мощности (SVG), которые обеспечивают адаптивное управление нагревом проводов, снижая энергозатраты и повышая стабильность работы сети.

Рассмотрены ключевые этапы функционирования системы на базе SVG, включая генерацию мощности, многоуровневое управление (координационный, управляющий и исполнительный уровни) и интеллектуальный мониторинг в реальном времени. Эта система не только предотвращает образование наледи, но и эффективно удаляет уже существующий лед, реагируя на изменения погодных условий.

Использование SVG уже зарекомендовало себя как перспективное направление, однако для его широкомасштабного внедрения требуется поэтапная реализация в наиболее проблемных регионах, что позволит оптимизировать затраты и избежать перегрузки энергосистемы.

Для дальнейшего повышения эффективности SVG для цели борьбы с гололедом на проводах контактной сети предлагается:

1. Оптимизировать распределение реактивной мощности с учетом реального состояния сети и нагрузки, что позволит минимизировать потери энергии.
2. Разработать гибридные системы, сочетающие SVG с контактными и бесконтактными методами нагрева, механическими очистителями и химическими реагентами. Такой подход позволит адаптировать систему под конкретные условия эксплуатации.
3. Использовать инновационные методы защиты контактной сети от обледенения, включая интеллектуальные системы прогнозирования, которые анализируют данные метеостанций и датчиков контактной сети, предсказывая зоны возможного обледенения.
4. Усовершенствовать сенсорные технологии, включая инфракрасные и лазерные датчики, позволяющие точно определять толщину наледи и активировать систему только при необходимости, снижая энергопотребление.

Для успешного внедрения технологии плавки гололеда с применением SVG требуется комплексное развитие систем мониторинга, адаптивного управления и оптимизации энергопотребления. Интеграция с интеллектуальными системами управления и алгоритмами прогнозирования позволит минимизировать затраты, повысить надежность железнодорожной инфраструктуры и обеспечить бесперебойное и безопасное движение поездов даже в сложных климатических условиях.

Использование SVG для борьбы с образованием гололеда в сочетании с переключателями емкости (TSC) и реакторами (TSR) позволит гибко адаптироваться к изменениям погодных условий и создать по-настоящему интеллектуальную систему борьбы с обледенением. Внедрение таких решений — это шаг к устойчивой и энергоэффективной железнодорожной инфраструктуре будущего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ван Г. Анализ и исследование проблем таяния льда и защиты от льда на контактной сети / Г. Ван // Журнал железнодорожного инжиниринга. — 2009. — № 1(8). — С. 93–95.
2. Baidu: новостной портал. — Гуйян, 2022. — URL: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1753438624293745000&wfr=spider&for=pc> (дата обращения: 20.01.2025).
3. Синьхуа: информационное агентство. — Пекин, 2017. — URL: http://www.xinhuanet.com/world/2017-01/12/c_129443503.htm (дата обращения: 23.09.2024).
4. CCTV: новостной портал. — Пекин, 2019. — URL: <https://news.cctv.com/2019/02/01/ARTIMchFFg3b0V7KO3cGxDk5190201.shtml/> (дата обращения: 24.09.2024).
5. CCTV: новостной портал. — Пекин, 2024. — URL: <https://news.cctv.com/2024/02/03/ARTIbzmEE2PcxKKpnp5073IC240203.shtml> (дата обращения: 24.09.2024).
6. СПб Дневник: новостной портал. — СПб., 2024. — URL: <https://spbnevnik.ru/news/2024-04-03/izza-obledeneniya-kontaktnoy-seti-na-finlyandskom-napravlenii-otmeneny-poezda> (дата обращения: 25.09.2024).
7. Грабош Т. Доклад о противообледенении контактного провода / Т. Грабош. — URL: https://igralub.com/wp-content/uploads/2022/03/741_hp-Fahrdrahtenteisung.pdf (дата обращения: 21.01.2025).
8. Богданова К. В. Методика и технические решения управляемого профилактического подогрева проводов контактной сети постоянного тока: дисс. ... канд. техн. наук. — Самара, 2024. — 162 с.
9. Трубицин М. А. Анализ способов обнаружения гололеда на проводах ЛЭП и их применение для контактной сети / М. А. Трубицин, О. Г. Лукашевич // ИВД. — 2016. — № 4(43). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sposobov-obnaruzheniya-gololeda-na-provodah-lep-i-ih-primenenie-dlya-kontaktnoy-seti> (дата обращения: 12.01.2025).
10. Savadjiev K. Modeling of icing and de-icing on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data / K. Savadjiev, M. Farzaneh // IEEE Transactions on power delivery. — 2004. — Vol. 19. — Iss. 2. — Pp. 715–721.
11. Чэнь Ч. Исследование методов онлайн-защиты контактной сети электрифицированных железных дорог от обледенения / Ч. Чэнь. — Сычуань: Сианьский транспортный университет, 2015.
12. The Paper: новостной портал. — Хубэй, 2024. — URL: https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_26296554 (дата обращения: 20.01.2025).
13. Hallett J. Experimental studies of the crystallization of supercooled water / J. Hallett // Journal of the Atmospheric Sciences. — 1964. — Vol. 21. — Iss. 6. — Pp. 671–682.
14. Sohu: новостной портал. — Пекин, 2024. — URL: https://www.sohu.com/a/756936412_120582872 (дата обращения: 20.01.2025).
15. Пневмобарабан для механической очистки гололеда с контактного провода // BizOrg. ua. — URL: <https://ua.bizorg.su/ustroystva-gololedoochistitelnye-r/p16132835-pnevmobaraban-dlya-mekhanicheskoy-ochistki-gololeda-s-kontaktного-provoda> (дата обращения: 01.02.2025).

16. Baidu: новостной портал. — Ухань, 2024. — URL: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791598187668354526&wfr=spider&for=pc> (дата обращения: 25.01.2025).
17. Baidu: новостной портал. — Ухань, 2024. — URL: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791516491744205247&wfr=spider&for=pc> (дата обращения: 28.01.2025).
18. RZD Center: информационный портал. — М., 2025. — URL: <https://rzd.center/colibri-u> (дата обращения: 31.01.2025).
19. Цзэн Л. Исследование гибридной модели компенсации неуравновешенной трехфазной нагрузки в распределительной сети низкого напряжения на основе SVC+SVG / Л. Цзэн. — Цзянси: Наньчанский университет, 2019.
20. Син Ц. Исследования по оптимизации технологии защиты от обледенения контактной сети электрифицированных железных дорог / Ц. Син. — Сычуань: Сианьский транспортный университет, 2021.

Дата поступления: 09.01.2025

Решение о публикации: 27.02.2025

Контактная информация:

ЛИ Ююань — аспирант; 1005458004@qq.com

ВИКУЛОВ Илья Павлович — канд. техн. наук, доц.; i_vikulov@mail.ru

Development of an Anti-Ice/Ice-Melting Technology for Railway Catenary Systems

Li Yiyuan, I. P. Vikulov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Li Yiyuan, Vikulov I. P. Development of an Anti-Ice/Ice-Melting Technology for Railway Catenary Systems. *Bulletin of scientific research results*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 183–200. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-183-200

Summary

Purpose: To analyze modern technologies for combating icing of railway overhead contact network focusing on the development and application of ice melting methods with a special emphasis on China's practices. To identify key achievements of leading countries in this field, trace the evolution of technologies, conduct a comparative analysis of the practices applied in Russia, China and other countries, and identify their advantages and disadvantages. **Methods:** The study is based on the analysis of current scientific publications and an integrated approach to the study of technologies for combating icing of the railway contact network. The study of intelligent control systems, in particular the use of static reactive power generators (SVG) in combination with compensating devices that allow adapting the system parameters to weather changes in real time. A comparative analysis of widely used methods of combating icing in different countries in order to identify their advantages and disadvantages, as well as to assess the prospects for further development

of technologies. **Results:** Key methods of de-icing of the contact network such as phase heating, the use of static reactive power generators (SVG) and the integration of intelligent control systems are found to contribute to improved system reliability and energy efficiency. The study has shown that the introduction of modern innovative solutions allows optimizing the de-icing process, reducing operating costs and adapting technologies to difficult climatic conditions. **Practical significance:** This article serves as a basis for understanding the existing de-icing systems for railway contact networks. The focus is on analyzing the practices of leading countries in this field, which can be used as a reference for the development of de-icing technologies worldwide. The innovative approaches described in the paper can be integrated into existing systems to increase their reliability, reduce operating costs and improve environmental sustainability. On the basis of the presented data and graphical materials, the real prospects for the implementation of modern solutions for the protection of railway contact networks have been assessed.

Keywords: Railway, catenary, contact wire, icing, methods of combating icing.

References

1. Van G. Analiz i issledovanie problem tayaniya l'da i zashchity ot l'da na kontaktnoy seti [Analysis and research on ice melting and ice protection problems on the contact network]. *Zhurnal zheleznodorozhnogo inzhiniringa* [Journal of Railway Engineering]. 2009, Iss. 1(8), pp. 93–95. (In Russian)
2. *Baidu: novostnoy portal* [Baidu: news portal]. Guyyan, 2022. Available at: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1753438624293745000&wfr=spider&for=pc> (accessed: January 20, 2025).
3. *Sin'khua: informatsionnoe agentstvo* [Xinhua: news agency]. Pekin, 2017. Available at: http://www.xinhuanet.com/world/2017-01/12/c_129443503.htm (accessed: September 23, 2024).
4. *CCTV: novostnoy portal* [CCTV: news portal]. Pekin, 2019. Available at: <https://news.cctv.com/2019/02/01/ARTIMchFFg3b0B7KO3cGxDk5190201.shtml/> (accessed: September 24, 2024).
5. *CCTV: novostnoy portal* [CCTV: news portal]. Pekin, 2024. Available at: <https://news.cctv.com/2024/02/03/ARTIbzmEE2PcxKKpnp5073IC240203.shtml> (accessed: September 24, 2024).
6. *SPB Dnevnik: novostnoy portal* [SPB Dnevnik: news portal]. St. Petersburg, 2024. Available at: <https://spbdnevnik.ru/news/2024-04-03/izza-obledeneniya-kontaktnoy-seti-na-finlyandskom-napravlenii-otmeneny-poezda> (accessed: September 25, 2024).
7. Grabosh T. *Doklad o protivooledenanii kontaktного provoda* [Report on anti-icing of contact wire]. Available at: https://igralub.com/wp-content/uploads/2022/03/741_hp-Fahrdrahtenteisung.pdf (accessed: January 21, 2025).
8. Bogdanova K. V. *Metodika i tekhnicheskie resheniya upravlyаемого profilakticheskogo podogreva provodov kontaktной seti postoyannogo toka: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Methodology and technical solutions for controlled preventive heating of DC contact network wires: diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. Samara, 2024, 162 p. (In Russian)
9. Trubitsin M. A., Lukashevich O. G. *Analiz sposobov obnaruzheniya goleleda na provodakh LEP i ikh primeneniye dlya kontaktной seti* [Analysis of methods for detecting ice on power transmission line wires and their application for the contact network]. IVD, 2016, Iss. 4(43). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sposobov-obnaruzheniya-goleleda-na-provodah-lep-i-ih-primeneniye-dlya-kontaktной-seti> (accessed: January 12, 2025). (In Russian)

10. Savadjiev K., Farzaneh M. Modeling of icing and de-icing on overhead power lines based on statistical analysis of meteorological data. *IEEE Transactions on power delivery*, 2004, vol. 19, Iss. 2, pp. 715–721.
11. Chen' Ch. *Issledovanie metodov onlayn-zashchity kontaktной seti elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog ot obledeneniya* [Research on Online Anti-Icing Methods for the Catenary of Electrified Railways]. Sychuan': Sian'skiy transportnyy universitet Publ., 2015.
12. *The Paper: novostnoy portal* [The Paper: news portal]. Khubey, 2024. Available at: https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_26296554 (accessed: January 20, 2025).
13. Hallett J. Experimental studies of the crystallization of supercooled water. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1964, vol. 21, Iss. 6, pp. 671–682.
14. *Sohu: novostnoy portal* [Sohu: news portal]. Pekin, 2024. Available at: https://www.sohu.com/a/756936412_120582872 (accessed: January 20, 2025).
15. Pnevmoabaraban dlya mekhanicheskoy ochistki gololeda s kontaktного provoda. *BizOrg.ua*. Available at: <https://ua.bizorg.su/ustroystva-gololedoochistitelnye-r/p16132835-pnevmoabaraban-dlya-mekhanicheskoy-ochistki-gololeda-s-kontaktного-provoda> (accessed: February 01, 2025).
16. *Baidu: novostnoy portal* [Baidu: news portal]. Ukhan', 2024. Available at: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791598187668354526&wfr=spider&for=pc> (accessed: January 25, 2025).
17. *Baidu: novostnoy portal* [Baidu: news portal]. Ukhan', 2024. Available at: <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1791516491744205247&wfr=spider&for=pc> (accessed: January 28, 2025).
18. *RZD Center: informatsionnyy portal* [RZD Center: information portal]. Moscow, 2025. Available at: <https://rzd.center/colibri-u> (accessed: January 31, 2025). (In Russian)
19. Tszen L. *Issledovanie gibridnoy modeli kompensatsii neuravnoveshennoy trekhfaznoy nagruzki v raspredelitel'noy seti nizkogo napryazheniya na osnove SVC+SVG* [Research on Hybrid Compensation Model for Unbalanced Three-Phase Load in Low-Voltage Distribution Network Based on SVC+SVG]. Tszyansi: Nan'chanskiy universitet Publ., 2019.
20. Sin Ts. *Issledovaniya po optimizatsii tekhnologii zashchity ot obledeneniya kontaktной seti elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* [Research on Optimization of Anti-icing Technology for Overhead Contact Network of Electrified Railways]. Sychuan': Sian'skiy transportnyy universitet Publ., 2021.

Received: January 09, 2025

Accepted: February 27, 2025

Author's information:

Yiyuan LI — Postgraduate Student; 1005458004@qq.com

Ilya P. VIKULOV — PhD in Engineering, Associate Professor; i_vikulov@mail.ru