

УДК 621.315.175

Автоматизированный метод определения обледенения контактного провода на основе контроля фазового перехода воды

В. А. Бараусов

ООО «ГК ИМСАТ», Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, ул. Гражданская, 7

Для цитирования: Бараусов В. А. Автоматизированный метод определения обледенения контактного провода на основе контроля фазового перехода воды // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 4. — С. 64–77. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-64-77

Аннотация

Цель: Повышение надежности работы контактной сети и снижение эксплуатационных затрат за счет выявления обледенения контактного провода. Рассматривается метод обнаружения наледи, основанный на регистрации тепловых эффектов, сопровождающих фазовый переход воды из твердого состояния в жидкое и обратный ему. **Методы:** Методология базируется на теплофизическом анализе параметров данного процесса. Предложен специализированный модуль, расположенный на контактном проводе с двумя температурными датчиками и двумя разнесенными электрическими нагревателями, работающими в асинхронном режиме. Методика измерения включает вычисление разности температур между двумя удаленными друг от друга участками контактного провода и последующий анализ длительности фазового перехода воды из твердого в жидкое состояние для определения наличия наледи и измерения ее толщины. В статье приведены: конструктивная особенность и принцип работы специализированного модуля, методика определения и измерения толщины льда на основе анализа тепловых характеристик, математическая модель, сравнительный анализ эффективности предложенного решения с традиционными методами борьбы с обледенением. **Результаты:** Подтверждено, что при образовании льда формируется характерное температурное «плато» и наблюдается обнуление разности температур, что позволяет точно диагностировать обледенение и количественно оценить толщину наледи. Методика, основанная на анализе теплового процесса, принципиально нечувствительна к таким внешним факторам, как ветер и осадки, и высокочувствительна к наличию даже тонкого ледового отложения. **Практическая значимость:** Исследование подтверждает возможность оперативного и точного выявления наледи на проводе контактной сети, включая измерение ее толщины, с автоматической передачей данных в диспетчерскую систему. Предложенное решение может быть интегрировано в существующие системы антиобледенения, а также использовано при проектировании новых участков контактной сети.

Ключевые слова: Контактный провод, обледенение, автоматический мониторинг, теплофизический метод, фазовый переход, определение толщины льда.

Применяемые аббревиатуры: КП — контактный провод; ЛЭП — линия электропередачи; ЛО — ледовое отложение на контактном проводе при атмосферном обледенении.

Введение

Обледенение КП представляет собой одну из ключевых проблем эксплуатации электрифицированных железных дорог в зимний период. Образование ЛО приводит к ухудшению токосъема, повышенному износу токоприемников подвижного состава, а также создает угрозу нарушения графика движения поездов [1]. Традиционные методы борьбы с обледенением, такие как механическая очистка или химическая

обработка, зачастую оказываются недостаточно эффективными и экономически затратными [2]. В связи с этим особую актуальность приобретают технологии автоматического мониторинга [1], позволяющие в режиме реального времени фиксировать угрозу обледенения КП, основанные на современных принципах. Проблема борьбы с обледенением контактной сети имеет давнюю историю. Первые попытки механического удаления ЛО предпринимались еще в начале XX в. В 1950-х гг. появились химические методы обработки проводов, а в 1970-х — первые системы их электрического обогрева [3, 4]. Значительный прогресс был достигнут в конце 1990-х — начале 2000-х гг. с развитием микропроцессорной техники, позволившей создавать автоматизированные системы контроля и управления [5, 6]. Современные методы обнаружения обледенения на промышленных объектах, строительных конструкциях и инженерных коммуникациях включают вибрационные, оптические, акустические, тепловые и емкостные датчики, каждый из которых имеет характерные ограничения в различных условиях эксплуатации [6–9]. Анализ литературы подтверждает, что ни один из существующих подходов не является универсальным. Большинство из них либо обладают недостаточной точностью, либо сложностью технической реализации, либо требуют значительных энерго- и трудозатрат [9, 10].

Так, вибрационные методы чувствительны к ветру и шумам, требуют жесткого крепления и настройки под тип провода, а оптические подвержены ложным срабатываниям при тумане, росе и дожде, требуют чистки и стабильного освещения. Конденсаторные и акустические требуют точного контакта с поверхностью и устойчивых условий эксплуатации, уязвимы к вибрациям и загрязнениям.

В отличие от них, предлагаемый теплофизический модуль основан на контроле фазового перехода твердой воды (льда) в жидкое состояние. Это обеспечивает его надежность и универсальность, обусловленные прямым тепловым контактом с контролируемой поверхностью при полной независимости от ее электромагнитных и механических факторов.

Применение предложенной технологии позволяет снизить расходы при одновременном повышении надежности эксплуатации контактной сети в зимний период. Разработанные решения направлены не только на повышение надежности работы железнодорожной инфраструктуры, но и на оптимизацию эксплуатационных расходов за счет рационального использования энергоресурсов. Результаты исследований могут быть применены как для модернизации существующих систем антиобледенения, так и для проектирования новых участков контактной сети с учетом климатических особенностей региона.

Конструктивная особенность и принцип работы специализированного модуля для определения ледовых отложений на контактных проводах

Конструктивные особенности специализированного модуля для определения ЛО и измерения его толщины на длинномерных элементах, таких как КП и провода воздушных ЛЭП, поясняет рис. 1.

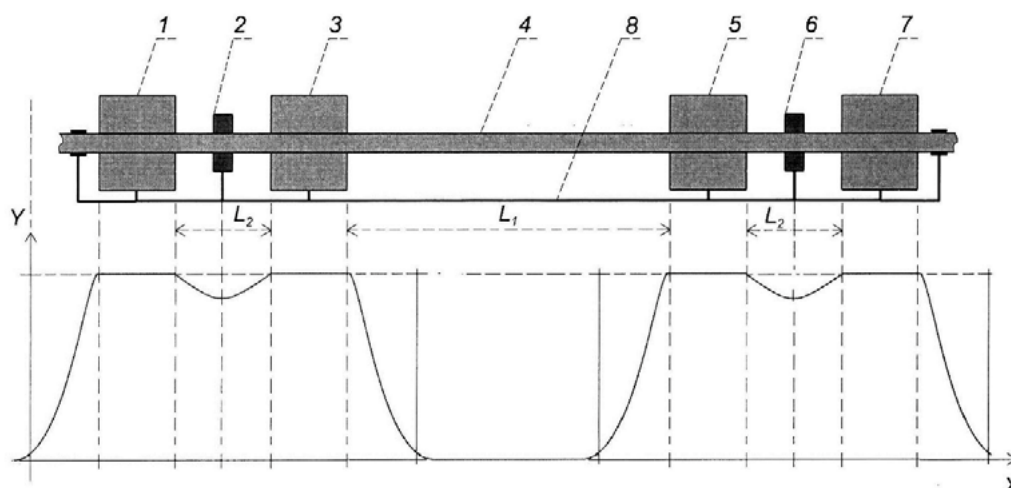


Рис. 1. Схема установки модуля с температурными датчиками и нагревателями на контактном проводе

Они заключаются в следующем: модуль содержит два датчика температуры — 2 и 6, которые жестко закреплены на КП 4 и корпусе 8 и разнесены по продольной оси контактного провода. Эти датчики предназначены для измерения температуры двух последовательных участков КП. Модуль включает два двухсекционных электрических нагревателя (1 — 3 и 5 — 7), закрепленных на корпусе КП. Нагреватели разнесены на расстояние L_1 , что исключает их взаимовлияние на тепловые процессы. Секции каждого нагревателя разнесены на расстояние, меньшем длины участков нагреваемого элемента [11].

Каждый датчик температуры установлен на равном расстоянии $L_2/2$ между соответствующими секциями нагревателей. Это обеспечивает равномерный нагрев и точное измерение температуры на контролируемых участках. Управление нагревателями, обработка данных и передача информации могут быть организованы с использованием внешнего микропроцессорного устройства, приемопередатчика и источника питания, размещаемых, например, на опоре контактной сети. При этом первый и второй нагреватели подключаются к источнику питания через систему управления, обеспечивающую их асинхронную работу с заданной временной задержкой. **Принцип работы модуля** основан на раздельном управлении нагревателями с временной задержкой Δt , что позволяет разделить процессы нагрева и регистрации температуры на двух участках и тем самым повысить точность обнаружения наледи. Для анализа используется разность температур $\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t)$ между первым и вторым участками, вычисляемая в процессе обработки данных. Конструктив модуля выполнен таким образом, что рама или корпус остаются открытыми для воздействия атмосферных осадков на участках длиной $L_2/2$ [11]. Возможность реализации передачи данных (например, с использованием беспроводного канала), а также функций управления нагревателями и питания модуля может быть обеспечена внешними средствами или

дополнительными устройствами [5, 12]. Таким образом, конструкция модуля обеспечивает высокую точность обнаружения ЛО за счет использования разнесенных пар нагревателей (1 — 3) и (5 — 7), датчиков температуры (2) и (6), асинхронного управления их работой и последующего анализа разности температур Δt непосредственно на КП. Это делает его эффективным для мониторинга обледенения на контактном проводе и других длинномерных элементах.

Методика определения и измерения толщины наледи основана на анализе тепловых эффектов, сопровождающих плавление ЛО с использованием **специализированного модуля** [12, 13].

Реализация данной методики на практике включает следующие этапы:

1. Подготовка к измерению

Модуль 1 монтируется на контролируемую поверхность КП так, чтобы обеспечить плотный тепловой контакт нагревателей и сенсоров с объектом измерения. На этапе калибровки выполняются следующие действия:

- Определяются температурные характеристики участка L_2 , на котором осуществляются нагрев и измерение.
- Задается мощность нагревателей, достаточная для плавления льда ($\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) в любых погодных условиях.
- Фиксируются расстояния L_1 (между нагревателями) и L_2 (между секциями одного нагревателя).

2. Проведение измерения

Первая пара нагревателей (например, (1 — 3)) включается, нагревая участок длиной L_2 до температуры плавления льда. Через время Δt включается вторая пара нагревателей (5 — 7). Датчики температуры записывают изменения $T_1(t)$ и $T_2(t)$ на своих участках. Микропроцессор вычисляет разность температур [14]:

$$\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t).$$

3. Анализ возникновения ледового отложения

Если на нагреваемом участке КП есть ЛО, то при нагреве до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура КП перестает расти, формируя так называемую «нулевую площадку» на графике температуры, показанную на рис. 2 $T(t)$, — так как подводимая теплота тратится на плавление льда. Разность $\Delta T(t)$ временно обнуляется, когда оба участка находятся в фазе плавления. В отсутствие льда температура КП монотонно растет, а $\Delta T(t)$ остается ненулевой [10, 11].

4. Расчет толщины льда

Длительность «нулевой площадки» t_{ϕ} на графике рис. 2 пропорциональна массе льда. Чем толще ЛО, тем больше времени требуется для его плавления [12, 13].

Масса льда m рассчитывается через затраченную энергию нагрева Q и удельную теплоту плавления льда λ по формуле:

$$m_1 = \frac{Pt_\phi}{\lambda},$$

где m_1 — масса льда, кг;
 P — мощность нагревателя, Вт;
 t_ϕ — время фазового перехода, с;
 λ — удельная теплота плавления, Дж/кг;
 h — толщина ледяной оболочки (ЛО), вычисляется через массу льда m_1 , его плотность ρ_1 и площадь поверхности S участка провода длиной L_2 по формуле:

$$h = \frac{m_1}{\rho_1 S}.$$

Результаты передаются через интерфейс в диспетчерскую службу. Методика отличается высокой точностью за счет учета разности температур $\Delta T(t)$, исключая влияние внешних помех.

Математическая модель теплового процесса в контролируемом участке контактного провода

Для количественной оценки наличия и толщины ЛО на контактном проводе используется математическая модель, основанная на анализе температурного отклика нагреваемых участков L_2 при плавлении ЛО. В модели рассматривается один контролируемый участок провода с закрепленным на нем нагревателем и температурным датчиком.

1. Баланс теплоты при плавлении ледового отложения на контактном проводе

Физической основой работы рассматриваемого устройства является уравнение теплового баланса:

$$\eta Q_{\text{вх}}(t) = Q_{\text{провод}}(t) + Q_{\text{плавление}}(m_1) + Q_{\text{потери}}(t).$$

2. Критерии фазового перехода

Температурное плато — основным признаком процесса плавления ЛО является временная задержка КП участков L_2 на уровне 0°C :

$T(t)$ — показание температурного датчика;

t_{ϕ_1} — момент начала выполнения условий плато (начало интервала измерения);

t_{ϕ_2} — момент окончания выполнения условий плато (конец интервала измерения).

$$T(t) \approx 0^\circ\text{C} \text{ при } t \in [t_1, t^2].$$

ТАБЛИЦА 1. Термины и обозначения математической модели

Обозначение	Описание	Единица измерения
Энергетические параметры		
$Q_{\text{вх}}(t) = Pt$	Энергия, подведенная к модулю за время t	Дж
$Q_{\text{провод}}$	Энергия, затраченная на нагрев провода за время t	Дж
$Q_{\text{плавление}}$	Энергия, затраченная на плавление наледи	Дж
$Q_{\text{потери}}$	Энергия теплопотерь в окружающую среду за время t	Дж
Общие параметры		
t	Время	с
P	Мощность нагревателя	Вт
η	Коэффициент эффективности (КПД) модуля, учитывающий потери при нагревании провода.	0,8–0,9
Параметры провода		
m_p	Масса участка провода в зоне нагрева	кг
c_p	Удельная теплоемкость материала провода	Дж/(кг · °С)
$T_p(t)$	Температура провода в момент времени t	°С
$T_{\text{нач}}$	Начальная температура провода	°С
ΔT_p	Изменение температуры провода ($T_p(t) - T_{\text{нач}}$)	°С
k_p	Коэффициент теплопроводности материала провода	Вт/(м · °С)
A_p	Площадь поперечного сечения провода	м ²
$T_{\text{окр}}$	Температура окружающего воздуха	°С
Параметры льда/наледи		
m_l	Масса льда	кг
h	Толщина слоя льда	м
ρ_l	Плотность льда	кг/м ³
c_l	Удельная теплоемкость льда	Дж/(кг · °С)
λ	Удельная теплота плавления льда	Дж/кг
$m_l = (dm_l/dt)$	Скорость плавления льда (d_m/d_t)	кг/с
k_l	Коэффициент теплопроводности льда	Вт/(м · °С)
A_l	Площадь поперечного сечения слоя льда для продольного теплопереноса	м ²
S	Площадь поверхности обледенения	м ²
Параметры тепловых потерь		
α	Коэффициент теплоотдачи	Вт/(м ² · °С)
A	Площадь поверхности теплообмена с окружающей средой	м ²
T	Температура поверхности модуля	°С
$T_{\text{окр}}$	Температура окружающего воздуха	°С
Временные параметры		
$t_{\phi 1}$	Момент времени начала фазового перехода (начала плато)	с
$t_{\phi 2}$	Момент времени окончания фазового перехода (окончания плато)	с
t_{ϕ}	Длительность фазового перехода (интервал плато, $t_{\phi 2} - t_{\phi 1}$)	с

Разностный сигнал — для повышения достоверности и отстройки от внешних помех используется разностный сигнал между двумя датчиками, расположенными на разных участках зоны нагрева:

$T_1(t), T_2(t)$ — показания двух температурных датчиков.

$\Delta T(t) \approx 0$ — свидетельствует о равномерном тепловом процессе в зоне контроля, характерном для плавления.

$$\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t) \approx 0.$$

Расчет продолжительности плавления ЛО является ключевым измеряемым параметром для дальнейшего расчета массы льда на КП:

$$t_{\phi} = t_{\phi 2} - t_{\phi 1}.$$

3. Расчет толщины ледового отложения

Расчет массы ледового отложения:

Масса ЛО рассчитывается из уравнения теплового баланса для интервала плавления:

$$m_l = \frac{\eta P t_{\phi} - Q_{\text{потерь}}}{\lambda}.$$

Расчет толщины ЛО

Толщина ЛО рассчитывается по формуле:

$$h = \frac{m_l}{\rho_l S}.$$

Расчет площади контролируемого участка

Для КП площадь поверхности S вычисляется как сумма площади боковой поверхности:

$$2\pi r L_2 + \pi r^2.$$

Итоговая формула определения толщины ледового отложения:

$$h = \frac{\eta P t_{\phi} - Q_{\text{потерь}}}{\lambda \rho_l (2\pi r L^2 + \pi r^2)}.$$

4. Дифференциальная форма записи теплового процесса

Для полного описания динамики тепловых процессов в системе «провод — наледь — окружающая среда» может быть использовано уравнение теплопроводности с учетом фазового перехода и граничных условий. Данная форма

описывает распределение мощности в системе в каждый момент времени и служит фундаментальной основой для анализа переходных процессов. Рассмотренная упрощенная модель для стадии установившегося плавления может быть получена из данной модели путем интегрирования по объему системы и введения ряда допущений о распределении температурных полей.

$$Q_{\text{вх}}(t) = m_p c_p \frac{dT_p}{dt} + m_l c_l \frac{dT_l}{dt} + m_l \lambda + \alpha A (T - T_{\text{окр}}) t_{\varphi} + k_p A_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + k_l A_l \frac{\partial^2 T_l}{\partial x^2}.$$

Подтверждение технической эффективности моделирования

Техническая эффективность предложенного метода определения наледи на длинномерных элементах контактной сети была подтверждена путем математического и имитационного моделирования тепловых процессов, происходящих в контролируемом участке провода при асинхронном нагреве [12, 13]. Моделирование позволило оценить отклик температурных датчиков при различных сценариях обледенения и проверить работоспособность разностного алгоритма определения фазы плавления льда. Особое внимание уделялось анализу динамики температурных кривых $T_1(t)$ и $T_2(t)$ при наличии и отсутствии наледи; исследованию разностного сигнала $\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t)$, а также оценке устойчивости метода к внешним тепловым возмущениям, таким как ветер.

В модели учитывались: геометрия провода (неограниченный цилиндр с диаметром 10 мм), теплопроводность и теплоемкость металла провода и наледи, удельная теплота плавления $\lambda = 334$ кДж/кг, коэффициент теплоотдачи α ветровому потоку, начальная толщина наледи (1–5 мм), мощность нагревателей (3,0–5,0 Вт), задержка между включениями нагревателей $\Delta t = 5$ с, температура воздуха (от -10 °C до $+2$ °C).

Результаты

В результате математического моделирования теплового процесса на контролируемом участке контактного провода получены температурные кривые [14] $T_1(t)$ и $T_2(t)$ для различных сценариев обледенения с начальной толщиной наледи от 1 до 5 мм. Анализ динамики температурных данных показал четкое проявление «температурного плато» при фазовом переходе «лед — вода», что подтверждает возможность точного определения времени плавления льда t_{φ} , показанного на рис. 2.

Разностный сигнал $\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t)$ продемонстрировал устойчивую зависимость возникновения и наличия ЛО: в ее отсутствии значение $\Delta T(t)$ оставалось отличным от нуля, тогда как при наличии наледи наблюдалась временная компенсация сигнала, обусловленная поглощением тепловой энергии при фазовом переходе.

Проведенное моделирование с различными ключевыми параметрами (мощность нагревателей 3,0–5,0 Вт, температура окружающей среды от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$) подтвердило стабильность и надежность метода в широком диапазоне условий. Задержка между включениями нагревателей $\Delta t = 5\text{ с}$ была выбрана как пример для выявления фазового перехода без значительных временных потерь.

Модель учитывала влияние теплопроводности материалов, теплоотдачи в окружающую среду и воздействия ветра, что в конечном итоге позволило обеспечить высокую точность оценки толщины ЛО по формуле:

$$h = \frac{m_l}{\rho_l S} = \frac{\eta P t_{\phi}}{\lambda \rho_l (2\pi r L_2 + \pi r^2)},$$

где все параметры определены с учетом физических свойств материалов и конструктивных особенностей измерительного участка.

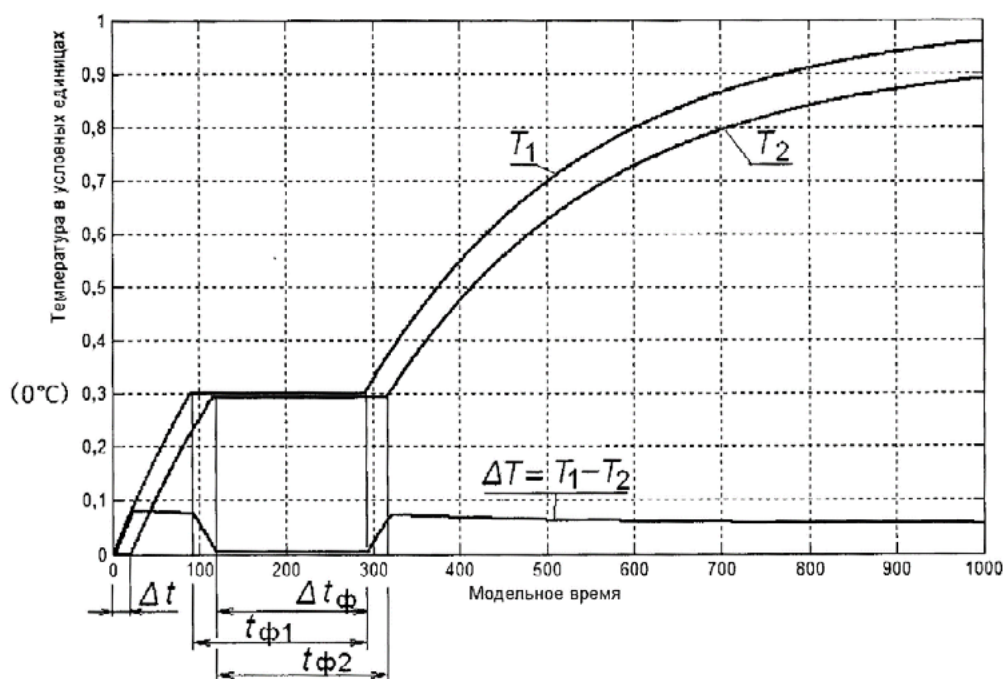


Рис. 2. Фиксация фазового перехода. График изменения температуры при таянии ледового отложения

График демонстрирует характерное плато $\Delta T(t)$ во время фазовых переходов, что служит основным критерием наличия ЛО на поверхности провода [13, 14].

Преимущества метода:

- помехоустойчивость и высокая надежность за счет разностной схемы измерения, исключающей влияние синфазных помех (ветровые нагрузки, солнечный нагрев, колебания температуры воздуха);
- высокая чувствительность к тонкому слою наледи (0,1–0,2 мм);

- количественная диагностика — прямое определение массы и толщины льда в реальном времени;
- масштабируемость и интеграция — возможность передачи данных в системы SCADA и диспетчеризации по каналам GSM/SMS, GPRS.

Таким образом, предложенный модуль существенно превосходит существующие аналоги по комплексу эксплуатационных и метрологических характеристик, особенно в условиях переменчивого климата, обеспечивая эффективный мониторинг и диагностику наледи на протяженных объектах.

Научная новизна заключается в разработке метода и специализированного модуля для количественной диагностики наледи, в котором:

1. Предложена конструкция модуля, включающего два температурных датчика и два электрических нагревателя, конструктивно размещенных по продольной оси корпуса с возможностью крепления на длинномерных объектах (на примере контактного провода).
2. Предложены принцип диагностики и математическая модель, основанные на асинхронном включении нагревателей и разностном анализе температурных кривых $\Delta T(t)$, что позволяет обеспечивать повышенную помехоустойчивость и точность фиксации фазового перехода агрегатного состояния воды.
3. Реализован энергобалансовый подход, который по продолжительности температурного плато плавления позволяет перейти от качественного обнаружения к количественному измерению — определению массы и толщины слоя наледи.
4. Доказана практическая реализуемость метода на микроконтроллерной платформе и его пригодность для верификации средствами имитационного моделирования.

Заключение

В работе представлен новый теплофизический метод обнаружения и количественной диагностики наледи, основанный на контроле фазового перехода агрегатного состояния воды. Метод реализован в виде специализированного модуля с двумя температурными датчиками и секционными нагревателями, асинхронный нагрев которых в сочетании с разностным анализом сигналов $\Delta T(t)$ обеспечивает высокую помехоустойчивость и точность.

Ключевым результатом работы является переход от качественного обнаружения обледенения к его количественному измерению — определению массы и толщины льда по продолжительности температурного плато плавления на основе энергобалансовой модели.

Внедрение предлагаемого решения позволяет:

1. Обеспечить раннее и достоверное выявление обледенения для предотвращения нарушений в работе ответственных объектов.

2. Принимать обоснованные оперативные решения на основе данных о толщине наледи.

3. Снизить эксплуатационные затраты за счет автономной работы и минимального обслуживания.

Таким образом, разработанная методика и конструкция модуля вносят вклад в повышение надежности и безопасности эксплуатации железнодорожной инфраструктуры в зимний период. Предложенный подход обладает значительным потенциалом для адаптации и применения в других отраслях, где критически важен мониторинг обледенения протяженных объектов (ЛЭП, мосты, ветрогенераторы и пр.).

Список источников

1. Горячев М. П. Система автоматизированного мониторинга силы тяжения провода воздушных линий электропередачи по параметрам кручения и провеса: дис. ... канд. техн. наук / М. П. Горячев. — Казань: КГЭУ, 2019. — 130 с.
2. Соловьев В. А. Автоматическая система удаления льда с проводов линий электропередач / В. А. Соловьев, В. М. Козин, Д. А. Орлов, С. И. Сухоруков. — Комсомольск-на-Амуре: Изд-во Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та, 2012.
3. Фадеев Г. М. История железнодорожного транспорта России / Г. М. Фадеев и др.; под общ. ред. Е. Я. Красковского, М. М. Уздина. — СПб.; М., 1994.
4. Ли И. Развитие технологии борьбы с гололедом на контактной сети железных дорог / И. Ли, И. П. Викулов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — № 1. — С. 183–200.
5. Козлов В. П. Развитие микропроцессорных систем управления в промышленности / В. П. Козлов, А. Н. Петров // Автоматизация и современные технологии. — 2001. — № 5. — С. 12–18.
6. Самарин А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП / А. Самарин, В. Масалов // Control Engineering Россия. — 2013. — Июнь.
7. Сигнализатор обледенения. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сигнализатор_обледенения (дата обращения: 30.07.2025).
8. Ратушняк В. С. Энергоэффективное предупреждение гололедообразования на основе электромеханического преобразователя: дис. ... канд. техн. наук / В. С. Ратушняк, М. В. Тимошенко. — Новосибирск: НГТУ, 2019. — 142 с.
9. Бубнов В. П. Анализ датчиков автоматической системы обогрева стрелочных переводов / В. П. Бубнов, В. А. Бараусов, Ш. Х. Султонов // Автоматика, связь, информатика. — 2022. — № 4. — С. 8–11.
10. 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).
11. Патент RU 2767246 Российская Федерация. Модуль периодического определения наледи на длинномерных элементах конструкций, в частности проводах воздушных ЛЭП / В. А. Бараусов, П. В. Григорьев, С. Г. Селянин; заявл. 04.08.2021; опубл. 18.03.2022.

12. Бараусов В. А. Имитационная модель асинхронного способа определения толщины льда на контролируемой поверхности / В. А. Бараусов // Интеллектуальные технологии на транспорте. — 2025. — № 2(42). — С. 20–28.

13. Патент RU 2763473 Российская Федерация. Способ и устройство определения толщины льда на рабочей поверхности датчика обледенения / В. А. Бараусов, П. В. Григорьев, А. Г. Семенов; заявл. 26.05.2021; опубл. 29.12.2021.

14. Султонов Ш. Х. Методика проведения эксперимента по климатическим испытаниям датчика обледенения / Ш. Х. Султонов, В. П. Бубнов, В. А. Бараусов, В. С. Забузов и др. // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы Третьей Международной научно-технической конференции. — Ташкент, 2024. — С. 392–402.

Дата поступления: 24.06.2025

Решение о публикации: 20.07.2025

Контактная информация:

БАРАУСОВ Виктор Александрович — руководитель проекта; barausovv@gmail.com

An Automated Method for Detecting the Icing of a Contact Wire Based on Thermophysical Phase Transition Control

V. A. Barausov

ООО "GC IMSAT", 7, Grazhdanskaya str., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Barausov V. A. An Automated Method for Detecting the Icing of a Contact Wire Based on Thermophysical Phase Transition Control. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 4, pp. 64–77. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-4-64-77

Summary

Purpose: To improve the reliability of the contact network operation and reduce operational costs through the detection of the icing of the contact wire, a thermophysical method is proposed. This method is based on the monitoring the thermal effect associated with the phase transition of water from solid to liquid.

Methods: The approach involves analyzing the thermophysical parameters of the «ice-water» phase transition. A specialized module is installed on the contact wire, equipped with two temperature sensors and two electric heaters positioned at a distance from one another, functioning in asynchronous mode. The measurement technique entails calculating the temperature difference between the two spaced-apart sections of the contact wire and subsequently analyzing the duration of the phase transition to determine the thickness of the ice. The paper presents a description of the design features and operational principles of a specialized module. It also describes a method for measuring ice thickness based on the analysis of thermal characteristics. A mathematical model is presented, as well as a comparative analysis of the effectiveness of the proposed solution compared to traditional methods of ice control. **Results:** It has been confirmed that a characteristic temperature «plateau» is formed in the presence of ice, with a zero temperature difference, allowing for accurate detection of ice and quantification of its thickness. This method, based on thermal analysis, is insensitive to symmetric external disturbances such as wind and precipitation but highly sensitive to even a thin layer of ice. **Practical significance:** The study confirms the feasibility of timely and accurate detection of ice and its thickness on the contact wire, with the data being transmitted to the control system.

This solution has the potential to be applied in the modernization of existing de-icing systems and the design of new sections of the contact network.

Keywords: Contact wire, icing, automatic monitoring, thermophysical method, phase transition, ice thickness detection.

References

1. Goryachev M. P. Sistema avtomatizirovannogo monitoringa sily tyazheniya provoda vozdushnykh liniy elektroperedachi po parametram krucheniya i provesa: dis. ... kand. tekhn. nauk [Automated monitoring system for wire tension in overhead power lines based on twisting and sag parameters: dis. ... Cand. of Engineering Sciences]. Kazan': KGEU Publ., 2019, 130 p. (In Russian)
2. Solov'ev V. A., Kozin V. M., Orlov D. A., Sukhorukov S. I. *Avtomaticheskaya sistema udaleniya l'da s provodov liniy elektroperedach* [Automatic system for ice removal from power line wires]. Komsomol'sk-na-Amure: Izd-vo Komsomol'skogo na Amure gos. tekhn. un-ta Publ., 2012. (In Russian)
3. Fadeev G. M. et al. *Istoriya zheleznodorozhnogo transporta Rossii* [History of railway transport in Russia]. Ed. by E. Ya. Kraskovsky, M. M. Uzdin. St. Petersburg; Moscow, 1994. (In Russian)
4. Li I., Vikulov I. P. Razvitie tekhnologii bor'by s gololedom na kontaktnoy seti zheleznykh dorog [Development of technologies for combating ice on railway contact networks]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Research Results]. 2025, Iss. 1, pp. 183–200. (In Russian)
5. Kozlov V. P., Petrov A. N. Razvitie mikroprotsessornykh sistem upravleniya v promyshlennosti [Development of microprocessor control systems in industry]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and Modern Technologies]. 2001, Iss. 5, pp. 12–18. (In Russian)
6. Samarin A., Masalov V. Sovremennye tekhnologii monitoringa vozdushnykh elektrosetey LEP [Modern technologies for monitoring overhead power lines]. *Control Engineering Rossiya* [Control Engineering Russia]. 2013, June. (In Russian)
7. *Signalizator obledeneniya* [Ice detector]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сигнализатор_обледенения (accessed: July 30, 2025). (In Russian)
8. Ratushnyak V. S., Timoshenko M. V. *Energoeffektivnoe preduprezhdenie gololedoobrazovaniya na osnove elektromekhanicheskogo preobrazovatelya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Energy-efficient prevention of ice formation based on an electromechanical converter: dis. ... Cand. of Engineering Sciences]. Novosibirsk: NGTU Publ., 2019, 142 p. (In Russian)
9. Bubnov V. P., Barausov V. A., Sultonov Sh. Kh. Analiz datchikov avtomaticheskoy sistemy obogreva strelochnykh perevodov [Analysis of sensors for an automatic heating system of switch points]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics]. 2022, Iss. 4, pp. 8–11. (In Russian)
10. Trubitsin M. A., Lukashevich O. G. *Analiz sposobov obnaruzheniya gololeda na provodakh LEP i ikh primenenie dlya kontaktnoy seti* [Analysis of methods for detecting ice on power line wires and their application to contact networks]. IVD, 2016, Iss. 4(43). (In Russian)

11. Barausov V. A., Grigor'ev P. V., Selyanin S. G. *Modul' periodicheskogo opredeleniya naledi na dlinnomernykh elementakh konstruktsiy, v chastnosti provodakh vozdukhnykh LEP* [Module for periodic detection of ice on linear structural elements, particularly on overhead power line wires]. Patent RF, no. 2767246. (In Russian)
12. Barausov V. A. Imitatsionnaya model' asinkhronnogo sposoba opredeleniya tolshchiny l'da na kontroliruемой poverkhnosti [Simulation model of an asynchronous method for determining ice thickness on a monitored surface]. *Intellectual'nye tekhnologii na transporte* [Intelligent Technologies in Transport]. 2025, Iss. 2(42), pp. 20–28. (In Russian)
13. Barausov V. A., Grigor'ev P. V., Semenov A. G. *Sposob i ustroystvo opredeleniya tolshchiny l'da na rabochey poverkhnosti datchika obledeneniya* [Method and device for determining ice thickness on the working surface of an ice detector]. Patent RF, no. 2763473. (In Russian)
14. Sultonov Sh. Kh., Bubnov V. P., Barausov V. A., Zabuzov V. S. et al. Metodika provedeniya eksperimenta po klimaticheskim ispytaniyam datchika obledeneniya [Methodology for conducting an experiment on climatic testing of an ice detector]. *Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy Tret'ey Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Railway Rolling Stock: Problems, Solutions, Prospects: Proceedings of the Third International Scientific and Technical Conference]. Tashkent, 2024, pp. 392–402. (In Russian)

Received: June 24, 2025

Accepted: July 20, 2025

Author's information:

Viktor Al. BARAUSOV — Project Manager; barausovv@gmail.com