

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2138>***А. Б. Киргеев¹, В. В. Каверин², Е. С. Котов³**^{1,2,3}Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда.¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6084-2594>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2021-7445>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2660-2010>*e-mail: kirgeyev.arman@gmail.com

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В статье рассмотрена задача разработки системы текущего контроля степени обледенения элементов конструкции сверхвысоковольтных воздушных линий электропередачи 500 кВ в условиях роста климатически обусловленных нарушений в работе магистральных электрических сетей Республики Казахстан. На основе анализа эксплуатационных данных показано, что значительная доля технологических нарушений связана с гололёдно-ветровыми воздействиями, вызывающими провисание и обрывы проводов, повреждение линейной арматуры, деформацию опор и отключения линий. Для количественной оценки условий гололёдообразования разработан критерий метеорологических параметров $K_{мет}$, основанный на совместном учёте температуры воздуха, относительной влажности и условий формирования ледяных отложений на цилиндрических проводниках. Предложенный критерий позволяет оценивать вероятность возникновения опасных режимов гололёдообразования и формировать диагностические признаки неблагоприятных климатических условий. На основе полученных результатов разработаны алгоритм функционирования системы текущего контроля степени обледенения элементов конструкции и структурная схема аппаратной части, включающая блоки мониторинга механического состояния элементов линии, климатических параметров, сбора и передачи данных, аналитической обработки информации и взаимодействия с инженерно-

техническим персоналом. Предлагаемый подход ориентирован на раннее выявление опасных режимов эксплуатации и снижение числа аварийных ситуаций на воздушных линиях электропередачи 500 кВ.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; сверхвысоковольтные линии электропередачи; обледенение; гололёд; метеорологические параметры; критериальный функционал; вероятность гололёдообразования; распределённый мониторинг.

Введение

Современные магистральные сети Республики Казахстан опираются на ЛЭП 500 кВ, обеспечивающие транзит мощности между регионами и межгосударственный переток. Рост нагрузок при старении инфраструктуры усиливает уязвимость элементов конструкции линии (опор, арматуры, изоляторов и др.), на которые одновременно воздействуют климатические, механические и электрохимические факторы, что приводит к увеличению числа технологических нарушений.

Снижение аварийных ситуаций требует перехода от реактивного устранения последствий к превентивному управлению на основе мониторинга и текущего контроля степени обледенения. Однако действующие решения остаются фрагментарными: противообледенительные мероприятия, контроль изоляции и защита от коррозии применяются разрозненно и не формируют единой оценки состояния, из-за чего дефекты выявляются с запаздыванием и меры принимаются несвоевременно [1].

В связи с этим актуальна разработка комбинированной системы текущего контроля степени обледенения элементов конструкции ЛЭП 500 кВ, объединяющей детерминированную и стохастическую обработку измерений в едином информационно-измерительном контуре.

Цель исследования: разработка системы текущего контроля степени обледенения элементов конструкции ЛЭП, обеспечивающей снижение риска повреждений под воздействием внешних факторов и сокращение числа аварийных ситуаций.

Задачи исследования:

- обосновать актуальность исследования и разработки системы текущего контроля степени обледенения элементов конструкции;
- выполнить анализ аварийности ЛЭП 500 кВ и причин отказов;
- сформировать критериальный функционал метеорологических параметров $K_{мет}$; для оценки условий гололёдообразования;
- разработать структурную схему аппаратной части системы текущего контроля технологического состояния элементов конструкции ЛЭП 500 кВ.

Научная новизна работы заключается в разработке обобщенного критериально-аналитического метода диагностики в относительных единицах, характеризующего степень обледенения элементов конструкции ЛЭП 500 кВ, основанного на синтезе детерминированной формализации метеофакторов и определении степени совпадения негативных факторов метеоусловий (температура и влажность), оказывающих существенное влияние на обледенение элементов конструкции ЛЭП 500 кВ.

Практическая значимость заключается в возможности дополнения существующих систем мониторинга, значительно снижающих аварийность и, как следствие, продлевающих срок службы оборудования магистральных сетей РК.

Материалы и методы

Объектом исследования являются воздушные линии электропередачи сверхвысокого напряжения, функционирующие в условиях климатических воздействий, способствующих образованию гололёдных отложений на проводах и элементах конструкции линии. Особое внимание уделяется влиянию метеорологических факторов на формирование ледяных нагрузок, приводящих к увеличению механических воздействий на проводники, линейную арматуру и опорные конструкции.

В качестве исходных данных использованы метеорологические параметры, характеризующие условия гололёдообразования, включая температуру воздуха и относительную влажность, а также сведения о характерных условиях эксплуатации воздушных линий электропередачи. Анализ указанных параметров выполнялся с учетом физических особенностей образования ледяных отложений на цилиндрических проводниках.

Оценка условий возникновения гололёдных отложений осуществляется на основе критерия метеорологических параметров $K_{мет}$, учитывающего совместное влияние температуры воздуха и относительной влажности на процессы формирования ледяного покрова. Значение данного критерия используется для определения вероятности возникновения опасных условий гололёдообразования.

Полученные результаты применяются при формировании алгоритма функционирования системы текущего контроля степени обледенения элементов конструкции воздушных линий электропередачи, включающего регистрацию климатических параметров, анализ состояния линии и передачу диагностической информации для принятия эксплуатационных решений.

В работе использованы следующие методы: стохастический метод исследования метеорологических параметров гололёдообразования; методы математического моделирования процессов аккреции мокрого снега на

цилиндрических проводниках; детерминированная формализация степени совпадения метеорологических факторов.

Результаты и обсуждение

ЛЭП 500 кВ являются ключевым звеном магистральных сетей Казахстана, обеспечивая межрегиональный транзит мощности, однако эксплуатационные данные последних лет фиксируют рост технологических нарушений и ускоренное старение элементов конструкции под совместным воздействием климатических, механических и электрохимических факторов.

По данным годовых отчётов АО «КЕГОС» за 2019-2023 гг. число нарушений на ЛЭП всех классов увеличилось с 165 до 205 (+24 %), при этом на линиях 500 кВ – с 47 до 65 случаев (+38 %); доминируют погодные причины (ветер, гололёд, грозовые воздействия) – до 71 %, далее следуют физический износ (12 %), электрохимическая коррозия (8 %), обрывы проводов (6 %) и внешние механические воздействия (3 %), причём коррозионные инциденты демонстрируют рост скрытых повреждений контактных и подземных узлов с 2 (2019г) до 5 (2023г) случаев [2; 3; 4; 5; 6].

Наиболее уязвимыми остаются проводниковая система и линейная арматура, для которых сочетание ветра и гололёда повышает механические напряжения и риск разрушения соединений, а также режимы ветрового воздействия, вызывающие галопирование и резонансные колебания элементов линии; металлоконструкции опор и узлы соединения с почвой, где коррозия снижает несущую способность и приводит к потере устойчивости; изоляция, чувствительная к увлажнению и загрязнению, что сопровождается ростом токов утечки и поверхностными разрядами [7; 8; 9; 10; 11].

В целом аварийность имеет каскадный характер: внешнее климатическое воздействие инициирует ухудшение состояния изоляции или соединений, повышает риск выхода из строя элементов конструкции. Это обосновывает переход от разрозненных мер защиты к комбинированной системе диагностики, объединяющей климатические факторы и технические характеристики элементов конструкции ЛЭП в едином информационно-измерительном контуре для раннего выявления предаварийных состояний и сокращения числа аварийных отключений.

Критерий условий гололёдообразования предназначен для количественной оценки степени негативных факторов текущих метеорологических условий, оказывающих существенное влияние на формирование снежно-ледяных отложений на токоведущих проводах и элементах конструкции ЛЭП 500 кВ. В основе критерия лежат детерминированная функция определения интенсивности аккреции и нормальный закон распределения Гаусса [12].

При наличии осадков и ветрового воздействия процесс гололёдообразования реализуется не всегда, а лишь при определённых сочетаниях температуры воздуха и относительной влажности. В связи с этим в рамках метеорологического критерия вводится вероятностная оценка условий образования гололёдно-изморозевых отложений.

Температура воздуха и относительная влажность рассматриваются как случайные величины, распределённые по нормальному закону. Вероятность возникновения гололёда определяется как вероятность попадания в область (1):

$$T \in [T_{\min} + T_{\max}], H \in [H_{\min} + H_{\max}], \quad (1)$$

где границы интервалов выбираются на основании климатических особенностей региона и статистики наблюдений. Пусть температура воздуха T и относительная влажность H в рассматриваемом интервале времени являются случайными величинами, каждая из которых подчиняется нормальному закону распределения. Тогда их плотности распределения имеют вид (1.1):

$$f_T(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T} \exp\left(-\frac{(t-\mu_T)^2}{2\sigma_T^2}\right), \quad f_H(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_H} \exp\left(-\frac{(h-\mu_H)^2}{2\sigma_H^2}\right), \quad (1.1)$$

где: t – текущее значение температуры воздуха, h – текущее значение относительной влажности;

μ_T, μ_H – математические ожидания (средние значения) температуры и влажности за выбранный период наблюдений;

σ_T, σ_H – среднеквадратические отклонения, характеризующие изменчивость соответствующих параметров [13].

Параметры и определяются по статистике наблюдений (метеостанции) и отражают локальные климатические особенности района прохождения ЛЭП 500 кВ.

Вероятность возникновения максимума негативного условия гололёдообразования определяется как вероятность одновременного попадания T и H в область (1). Для получения аналитически прозрачной формы принимается допущение о статистической независимости T и H в рассматриваемом временном окне, тогда совместная плотность представляется произведением частных плотностей (1.2):

$$f_{T,H}(t, h) = f_T(t)f_H(h). \quad (1.2)$$

Следовательно, искомая вероятность $P_{\text{вг}}$ вычисляется в соответствии с зависимостью (1.3):

$$P_{\text{вг}}(t) = \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} f_T(t) dt \cdot \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} f_H(h) dh, \quad (1.3)$$

где: $T_{\min}, T_{\max}$ – нижняя и верхняя границы температурного диапазона, при котором наибольшая часть гололёдных явлений наблюдается в диапазоне температур от $[-5; +1]$;

$H_{\min}, H_{\max}$ – границы диапазона относительной влажности, соответствующие преобладающим условиям формирования гололёда (в анализе показано, что наибольшая доля случаев относится к высоким значениям влажности, а именно 81-90 %).

В физическом смысле является вероятностной мерой соответствия текущей атмосферы для реализации процесса гололёдообразования. При малых значениях сочетание температуры и влажности статистически редко соответствует гололёдным режимам, а при больших значениях вероятность формирования отложений существенно возрастает. Для включения данной оценки в критериальный функционал метеорологических условий вероятность используется как индикатор реализуемости процесса и выступает множителем в выражении (3), тем самым снижая риск ложного завышения метеорологического критерия в ситуациях, когда осадки и ветер наблюдаются, но сочетание и неблагоприятно для образования гололёда.

Согласно модели в относительных единицах [11], удельная скорость нарастания массы отложений на единицу длины провода определяется выражением (2):

$$I(t) = b(t) \cdot V(t) \cdot w(t) \cdot A, \quad (2)$$

где: b – коэффициент прилипания снежно-ледяных отложений;

V – результирующая скорость удара частиц осадков о провод, включающая скорость ветра U и скорость оседания снежных частиц v_c ;

w – массовая концентрация мокрого снега в воздухе. Массовая концентрация в практических условиях определяется по интенсивности осадков P .

A – эффективная площадь улавливания на единицу длины провода (для цилиндра в первом приближении это проекционная площадь на единицу длины, то есть $A = \eta D$, где η – коэффициент улавливания, а D – диаметр провода).

С учётом дискретного характера работы системы мониторинга расчёт интенсивности аккреции выполняется с заданным временным шагом Δt (а именно, каждые 30 минут). В связи с этим вводится критериальный функционал метеорологических условий и вероятности образования гололёдных отложений (3):

$$K_{\text{мет}}(t) = \text{sat} \left(P_{\text{БГ}}(t) \cdot \frac{I(t)}{I_0} \right) = \text{sat} \left(P_{\text{БГ}}(t) \cdot \frac{b(t) \sqrt{U(t)^2 + v_{\text{с}}^2} \frac{P(t)}{v_{\text{с}}} A}{I_0} \right), \quad (3)$$

где: $P_{\text{БГ}}(t)$ – вероятность возникновения гололёдных отложений по нормальному закону распределения;

$I(t)$ – интенсивность аккреции;

I_0 – опорное (нормирующее) значение интенсивности аккреции, соответствующее границе перехода от слабого налипания к интенсивному обледенению при типовых для региона условиях.

Значение изменяется в диапазоне от 0 до 1 и характеризует вероятность и интенсивность процессов гололёдообразования в текущий момент времени [11]. Интерпретация значений критерия сведена в таблицу 1.

Таблица 1 – Интерпретация значений

№	Значение критерия	Интерпретация
1	0,0 – 0,3	Условия неблагоприятны для гололёдообразования
2	0,3 – 0,5	Возможны слабые отложения
3	0,5 – 0,7	Опасные условия, вероятен интенсивный рост отложений
4	0,7 – 1,0	Высокая вероятность интенсивного гололёдообразования

Таким образом, разработанный критериальный функционал позволяет реализовать текущий контроль степени совпадения негативных факторов метеоусловий (температура и влажность), оказывающих существенное влияние на обледенение элементов конструкции ЛЭП 500 кВ.

Разработанная структура ориентирована на распределённый сбор разнородной диагностической информации непосредственно на опорах ЛЭП, её предварительную обработку и нормирование, а также централизованную интеллектуальную обработку данных с последующим формированием диагностических выводов и рекомендаций для инженерно-технического персонала. Иерархическая функционально-информационная архитектура системы текущего контроля степени обледенения изображена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Иерархическая функционально-информационная архитектура системы текущего контроля степени обледенения

В соответствии со информационной архитектурой системы текущего контроля степени обледенения элементов конструкции ЛЭП 500 кВ была синтезирована структурная схема аппаратной части системы текущего контроля степени обледенения элементов конструкции ЛЭП 500 кВ, представленная на рисунке 2.

ММС – (блок мониторинга механического состояния) контроль механики опоры: ДУН (наклона), ДВО (вибрации), ДНП (натяжения провода), ДНО (нагрузки на оттяжки).

МКП – (блок мониторинга климатических параметров) контроль климата на опоре: ДТ (температуры), ДВ (влажности), ДСВ (скорости ветра) ДО (осадков); данные используются для оценки метеоусловий и расчёта входов $K_{мет}$ / вероятности гололёдообразования.

СНиАИ – (блок сбора, нормирования и архивации информации) сбор/синхронизация/нормирование/кратковременное хранение данных ММС и МКП; опрос датчиков, передача в ПОиПДС.

ПОиПДС – (блок предварительной обработки и передачи данных на сервер) фильтрация, контроль целостности и пакетирование телеметрии; передача в единый вычислительно-аналитический модуль.

Единый вычислительно-аналитический модуль (сервер) – расчёт диагностических показателей (критериальные функционалы), оценка состояния элементов конструкции, интегральная оценка риска и прогноз опасных режимов.

АРМ ИТП – (автоматизированное рабочее место инженерно-технического персонала) визуализация, архивация, генерация рекомендации; прямого управления объектом не выполняет – только поддержка принятия решений.

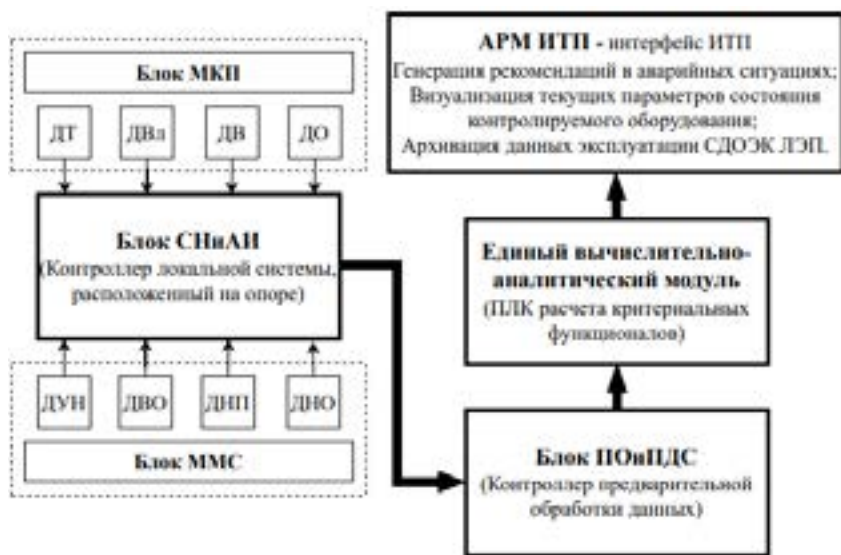


Рисунок 2 – Структурная схема аппаратной части системы диагностики элементов конструкции ЛЭП 500 кВ

Выводы

В статье обоснована актуальность разработки системы текущего контроля степени обледенения элементов конструкции ЛЭП 500 кВ Республики Казахстан, поскольку магистральные перетоки мощности опираются на линии данного класса, а рост нагрузок в связи с ростом

энергопотребления производственными предприятиями и негативное влияние климатических факторов повышает вероятность технологических нарушений. Внедрение автоматизированных систем диагностики текущих параметров эксплуатации ЛЭП позволит снизить количество отказов.

Анализ годовых отчётов АО «KEGOC» за 2019-2023 гг. показал рост аварийных ситуаций на ЛЭП 500 кВ с 47 до 65 случаев (+38 %), причём основная доля связана с погодными воздействиями (ветер, гололёд, грозовые явления) – до 71 %, что подтверждает каскадный сценарий развития отказов: метеовоздействия инициируют провисание и обрывы токоведущих проводов, разрушение элементов арматуры, деформацию или падение опор, а также межфазные короткие замыкания.

Для раннего выявления опасных условий разработан критериальный функционал $K_{\text{мет}}$, представляющий собой безразмерный интегральный показатель в диапазоне 0-1, который объединяет вероятностную оценку сочетания температуры и влажности (нормальное распределение Гаусса) и детерминированную модель интенсивности аккреции мокрого снега, нормированную опорным значением. Критерий метеорологических условий гололёдообразования обеспечивает количественную интерпретацию текущих метеословий, снижает риск ложного завышения оценки и формирует основу для предупредительных сообщений ИТП.

Разработанная структурная схема аппаратной части реализует распределённый сбор данных на опоре (ММС и МКП), их синхронизацию/нормирование (СНиАИ), предварительную фильтрацию и передачу (ПОиПДС) на центральный вычислительно-аналитический модуль для расчёта $K_{\text{мет}}$ и выдачу рекомендаций ИТП, что позволяет перейти к технологическому режиму плавки снежно-ледяных отложений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 CIGRE USNC. Approach for Asset Management of Overhead Transmission Lines (TOR JWG B2/C1). 2021

2 АО «KEGOC». Годовой отчет за 2019 год. – Нур-Султан, 2020. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/e3a/e3ad4db40f45b0a3c3783972a55a7b50.pdf>. (Дата обращения: 19.01.2025)

3 АО «KEGOC». Годовой отчет за 2020 год. – Нур-Султан, 2021. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/7b7/7b7b0257e953230fb935401a6bd76c66.pdf>. (Дата обращения: 19.01.2025)

4 АО «KEGOC». Годовой отчет за 2021 год. – Нур-Султан, 2022. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/063/c4rkeuhtwv3v569zkm0mudm5i68g1xz.pdf>. (Дата обращения: 19.01.2025)

5 АО «KEGOC». Годовой отчет за 2022 год. – Астана, 2023. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/68b/pwd8mvqgomgjuz2ub5kt5cileq1cl3mq.pdf>. (Дата обращения: 19.01.2025)

6 АО «KEGOC». Годовой отчет за 2023 год. – Астана, 2024. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/bc1/6nmbmtsltvhfblds9i5g9foltkzrwd05.pdf>. (Дата обращения: 19.01.2025)

7 **Войткевич, С. В.** Исследование и разработка распределенной системы катодной защиты элементов опор высоковольтных линий электропередач. – Диссертация на соискание ученой степени PhD. – Карагандинский государственный технический университет, 2016.

8 **Валеева, Г. Р.** Влияние климатических факторов на провод воздушной линии электропередачи // Электроэнергетика. Передача и распределение. – 2022. – №3. – С. 56-64. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-klimaticheskikh-faktorov-na-provod-vozdushnoy-linii-elektroperedachi> (Дата обращения: 10.02.2025).

9 **Иванов, В. А.** Разработка методов контроля состояния изоляторов высоковольтных ВЛЭП по величине токов утечки с телеметрической передачей информации. – Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD). – Карагандинский технический университет, 2021.

10 **Бигун, А. Я.** Расчет температуры и потерь энергии в проводах воздушных линий при нестационарных тепловых режимах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск: НГТУ, 2018. – 150 с. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dissercat.com/content/raschet-temperatury-i-poter-energii-v-provodakh-vozdushnykh-linii-pri-nestatsionarnykh-teplo> (Дата обращения: 10.02.2025).

11 **Yang J., Guo Q., Wang Y., et al.** Influence of meteorological parameters on radon exhalation from soil surface: Science of the Total Environment – Vol. 649, 2019 – Pp. 1409–1416. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718348198?via%3Dihub> (Дата обращения: 30.10.2025)

12 **Kringlebotn Nygaard, BE, H. Ágústsson, K. Somfalvi-Tóth,** 2013: Моделирование накопления мокрого снега на линиях электропередач: усовершенствования предыдущих методов с использованием 50 лет наблюдений. J. Appl. Meteor. Climatol., 52, 2189–2203, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0332.1>.

13 **Вентцель, Е. С., Овчаров, Л. А.** Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.

REFERENCES

1 CIGRE USNC. Approach for Asset Management of Overhead Transmission Lines (TOR JWG B2/C1). 2021

2 AO «KEGOC». Godovoy otchet za 2019 god. – Nur-Sultan, 2020. – [Annual report for 2019 of the Joint-stock company «Kazakhstan electricity grid operating company»] [Web-resource]. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/e3a/e3ad4db40f45b0a3c3783972a55a7b50.pdf>. (Accessed 19.01.2025)

3 AO «KEGOC». Godovoy otchet za 2020 god. – Nur-Sultan, 2021. – [Annual report for 2019 of the Joint-stock company «Kazakhstan electricity grid operating company»] [Web-resource]. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/7b7/7b7b0257e953230fb935401a6bd76c66.pdf>. (Accessed 19.01.2025)

4 AO «KEGOC». Godovoy otchet za 2021 god. – Nur-Sultan, 2022. – [Annual report for 2019 of the Joint-stock company «Kazakhstan electricity grid operating company»] [Web-resource]. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/063/c4rkeuhitwv3v569zkm0mudm5i68g1xz.pdf>. (Accessed 19.01.2025)

5 AO «KEGOC». Godovoy otchet za 2022 god. – Astana, 2023. – [Annual report for 2019 of the Joint-stock company «Kazakhstan electricity grid operating company»] [Web-resource]. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/68b/pwd8mvqgomgjuz2ub5kt5ci1cq1cl3mq.pdf>. (Accessed 19.01.2025)

6 AO «KEGOC». Godovoy otchet za 2023 god. – Astana, 2024. – [Annual report for 2019 of the Joint-stock company «Kazakhstan electricity grid operating company»] [Web-resource]. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/bc1/6nmbmtsltvhfbls9i5g9foltkzrwd05.pdf>. (Accessed 19.01.2025)

7 **Voytkovich, S. V.** Issledovanie i razrabotka raspredelennoi sistemy katodnoi zashchity elementov opor vysokovol'tnykh linii elektroperedach. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora filosofii (PhD). Karagandinskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. [Research and development of a distributed cathodic protection system for structural elements of high-voltage transmission lines : dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD)] [Text] – Karaganda, 2016, 117 p.

8 **Valeeva, G. R.** Vliyaniye klimaticheskikh faktorov na provod vozduшной linii elektroperedachi [Influence of climatic factors on overhead transmission line conductors]. – Elektroenergetika. Peredacha i raspredelenie. – 2022. – No. 3.–

P. 56–64. [Electronic resource]. – Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-klimaticheskikh-faktorov-na-provod-vozdushnoy-linii-elektroperedachi> (Accessed 10 February 2025).

9 **Ivanov, V. A.** Razrabotka metodov kontrolya sostoyaniya izolyatorov vysokovol'tnykh VLEP po velichine tokov utechek s teletricheskoj peredachei informatsii. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora filosofii (PhD). Karagandinskii tekhnicheskii universitet. [Development of methods for monitoring the condition of high-voltage overhead transmission line insulators based on leakage current values with telemetric data transmission : dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD)] [Text] – Karaganda, 2021, 135 p.

10 **Bigun, A. Ya.** Raschet temperatury i poter' energii v provodakh vozdushnykh linii pri nestatsionarnykh teplovykh rezhimakh. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. [Calculation of temperature and energy losses in overhead line conductors under non-stationary thermal conditions : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. – 2018. – 150 p. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.dissercat.com/content/raschet-temperatury-i-poter-energii-v-provodakh-vozdushnykh-linii-pri-nestatsionarnykh-teplo> (Accessed 10 February 2025).

11 **Yang J., Guo Q., Wang Y., et al.** Influence of meteorological parameters on radon exhalation from soil surface: Science of the Total Environment – Vol. 649. – 2019 – p. 1409–1416. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718348198?via%3Dihub> (Accessed 30.10.2025)

12 **Kringlebotn Nygaard, B. E., H. Ágústsson, and K. Somfalvi-Tóth.** Modelirovanie nakopleniya mokrogo snega na liniyakh elektroperedach: usovershenstvovaniya predydushchikh metodov s ispol'zovaniem 50 let nablyudenii [Modelling wet snow accretion on power lines: improvements of previous methods using 50 years of observations] // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2013. – Vol. 52. – P. 2189–2203. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0332.1>

13 **Venttsel, E. S., Ovcharov, L. A.** Teoriya veroyatnostei i eyo inzhenernyye prilozheniya [Probability theory and its engineering applications]. Uchebnoe posobie dlya vtuzov. 2nd ed., stereotype. – Moscow: Vysshaya shkola, 2000. – 480 p.

Поступило в редакцию 16.01.26.

Поступило с исправлениями 23.04.26.

Принято в печать 05.06.26.

*А. Б. Киргеев¹, В. В. Каверин², Е. С. Котов³

^{1,2,3}Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

16.01.26 ж. баспаға түсті.

23.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

05.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АСА ЖОҒАРЫ КЕРНЕУЛІ ӘУЕ ЭЛЕКТР ЖЕТКІЗУ ЖЕЛІЛЕРІНІҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕРІНІҢ МҰЗДАНУ ДӘРЕЖЕСІН АҒЫМДАҒЫ БАҚЫЛАУ ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Мақалада Қазақстан Республикасының магистральдық электр желілерінде климаттық факторлардан туындайтын технологиялық бұзылулардың өсуі жағдайында 500 кВ аса жоғары кернеулі әуе электр жеткізу желілерінің конструкциялық элементтерінің мұздану дәрежесін ағымдық бақылау жүйесін әзірлеу мәселесі қарастырылған. Пайдалану деректерін талдау негізінде 500 кВ ӘЖЖ жұмысының бұзылуларының елеулі бөлігі көктайғақ-желдік әсерлермен байланысты екені көрсетілген. Мұндай әсерлер өткізгіштердің салбырауына және үзілуіне, желілік арматураның зақымдануына, тіректердің деформациялануына және желінің ажыратылуына алып келеді. Мұздану жағдайларын сандық бағалау үшін температура мен салыстырмалы ылғалдылықтың үйлесуін, сондай-ақ цилиндрлік өткізгіштерде мұз қабатының түзілу ерекшеліктерін ескеретін $K_{мет}$ критерийлік функционалы әзірленді. Бұл критерий қауіпті климаттық жағдайлардың қалыптасу ықтималдығын бағалауға және мұздану процесінің диагностикалық белгілерін анықтауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері негізінде мұздану дәрежесін ағымдық бақылау жүйесінің жұмыс алгоритмі қалыптастырылып, механикалық күйді бақылау, климаттық параметрлерді тіркеу, деректерді жинау және беру, аналитикалық өңдеу және инженерлік персоналмен өзара әрекеттесу блоктарын қамтитын құрылымдық сұлба ұсынылды. Ұсынылған тәсіл қауіпті режимдерді ерте анықтауға және 500 кВ ӘЖЖ-дегі апаттық жағдайлар санын азайтуға бағытталған.

Кілтті сөздер: әуе электр жеткізу желілері; аса жоғары кернеулі электр жеткізу желілері; мұздану; көктайғақ; метеорологиялық параметрлер; критерийлік функционал; көктайғақтың пайда болуы; үлестірілген мониторинг.

*A. B. Kirgeyev¹, V. V. Kaverin², Ye. S. Kotov³

^{1,2,3}Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov,

Republic of Kazakhstan, Karaganda

Received 16.01.26.

Received in revised form 23.04.26.

Accepted for publication 05.06.26.

DEVELOPMENT OF A REAL-TIME MONITORING SYSTEM FOR THE DEGREE OF ICING OF STRUCTURAL ELEMENTS OF EXTRA-HIGH-VOLTAGE OVERHEAD TRANSMISSION LINES

The paper addresses the development of a real-time monitoring system for the icing degree of structural elements of 500 kV extra-high-voltage overhead transmission lines under conditions of increasing weather-related disturbances in the backbone power grid of the Republic of Kazakhstan. Based on the analysis of operational data, it is shown that a significant share of failures of 500 kV overhead lines is associated with ice-wind impacts causing conductor sagging and breakage, damage to line fittings, tower deformation and line outages. To provide a quantitative assessment of icing conditions, a meteorological criterion K_{met} has been developed. The criterion is based on the combined consideration of air temperature, relative humidity and the physical conditions of ice accretion on cylindrical conductors. The proposed approach makes it possible to estimate the probability of hazardous icing conditions and to form diagnostic indicators of unfavorable climatic impacts. Based on the obtained results, an operational algorithm of the monitoring system is formulated and a structural diagram of its hardware architecture is proposed, including mechanical condition monitoring, climatic parameter monitoring, data acquisition and transmission, analytical data processing and interaction with engineering personnel. The proposed approach is aimed at early detection of hazardous operating conditions and reducing emergency situations on 500 kV overhead transmission lines.

Keywords: overhead transmission lines; extra-high-voltage transmission lines; icing; glaze ice; meteorological parameters; criterion functional; probability of ice formation; distributed monitoring.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz