

# Анализ методов диагностики электрохимической коррозии на воздушных линиях электропередач напряжением 220-500 кВ

<sup>1</sup>ТАРАН Николай Юрьевич, докторант, 1814n97@mail.ru,

<sup>1</sup>\*КАЛИНИН Алексей Анатольевич, PhD, зав. кафедрой, leokalinin@mail.ru,

<sup>1</sup>КАВЕРИН Владимир Викторович, к.т.н., и.о. профессора, kaverinkz@inbox.ru,

<sup>2</sup>САРСИКЕЕВ Ермак Жасланович, PhD, зав. кафедрой, sarsikeev.ertek@yandex.ru,

<sup>1</sup>НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

<sup>2</sup>НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Казахстан, Астана, пр. Женис, 62,

\*автор-корреспондент.

**Аннотация.** Выполнен анализ крупных мировых аварийных ситуаций в энергетической сфере и причин аварийных отключений на воздушных линиях электропередач напряжением 220-500 кВ в Республике Казахстан. Исследования затрагивают особенности конструкции опор portalного типа. Раскрыты причины возникновения электрохимической коррозии уязвимых узлов опор высоковольтных воздушных линий электропередач. Рассмотрены особенности методов диагностики остаточного ресурса металлических элементов крепления опор portalного типа, расположенных под землей. Рекомендованы наиболее перспективные методы для создания системы удаленного мониторинга и применения на воздушных линиях электропередач в Республике Казахстан. Приведены рекомендации для дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередач, опоры portalного типа, методы диагностики, надежность, электрохимическая коррозия, U-образный болт.

## Введение

Приоритетными направлениями развития науки Республики Казахстан в категории «Энергетика и машиностроение» являются:

- обеспечение надежного функционирования единой энергетической системы Республики Казахстан;

- внедрение современных инновационных и цифровых технологий;

- уменьшение технологических нарушений, приводящих к аварийным ситуациям [1].

На территории Республики Казахстан размещение производственных предприятий имеет ряд особенностей. Это обусловлено ориентированностью развития промышленности в первую очередь на добычу полезных ископаемых, а их месторасположение находится в труднодоступных местах, вдали от больших городов. Из-за крупного энергопотребления и отдаленности от крупных промышленных регионов увеличилось количество новых и нагрузка на уже существующих высоковольтных воздушных линиях электропередач напряжением 220 кВ и выше.

В единой энергетической системе Республики Казахстан для транспортировки и распределения

электроэнергии напряжением 220-500 кВ применяются воздушные линии, состоящие преимущественно из металлических опор portalного типа [2].

## Аварийные отключения на воздушных линиях электропередач напряжением 220-500 кВ

При эксплуатации воздушных линий электропередач возникают непредвиденные аварийные ситуации, которые приводят к отключениям. Каждое аварийное отключение сопровождается крупными экономическими затратами. В мировой энергетической истории были случаи крупномасштабных аварийных отключений электроэнергии с серьезными последствиями. Для дальнейшего развития энергетической отрасли Республики Казахстан необходимо учитывать опыт и проблемы, с которыми столкнулись энергопередающие организации зарубежных стран. Так, учеными Rahman K.M.J., Munnee M.M., Khan S. из Народной Республики Бангладеш в статье [3] произведен наиболее полный анализ крупных аварийных отключений в мире, которые произошли с 1965 по 2015 гг. В работе применялась формула для оценки повреждений при аварий-

ных отключениях. Формула в равной степени учитывает количество пострадавших людей и время восстановления последствий аварии. Согласно данной формуле был проведен анализ масштабов последствий и причин аварийных отключений. Еще в одной работе [4] ученых из Республики Колумбия были приведены данные об аварийных ситуациях во всем мире с 2003 по 2015 гг., а также произведена классификация происшествий в соответствии с причинами и экономическими последствиями. Но в данных работах не приведены методы и средства для уменьшения аварийных ситуаций.

На надежность передачи электроэнергии в Республике Казахстан, в условиях резко континентального климата, оказывают большое влияние погодные условия, которые в последнее время достигают экстремальных значений. Влияние погодных условий на надежность функционирования линий электропередач описано учеными из Южной Кореи и Индонезии в совместной работе [5]. Учеными был проведен анализ современных исследований в области устойчивости энергетической сети при воздействии экстремальных погодных условий. Были предложены варианты повышения надежности электросетевых узлов, но недостаточно полно описаны механизмы модернизации существующих высоковольтных воздушных линий электропередач.

В настоящее время воздушные линии электропередач 220-500 кВ, в преобладающем большинстве случаев, проходят по территории нескольких государств СНГ. Возникновение аварийных отключений при эксплуатации межгосударственных воздушных линий электропередач приводит не только к крупным социальным и экономическим последствиям, но и политическим [6].

В совместной работе ученых из Ирана, Сирии и Италии [6] выполнен анализ крупных аварийных отключений электроэнергии во всем мире и их наиболее распространенных причин. Одними из основных причин являются неисправность оборудования и человеческий фактор. По этой причине произошли 26% отключений. Для решения этой проблемы предлагается улучшать систему мониторинга, защит и управления энергосистемы, что приведет к повышению надежности электроснабжения. В данной работе не указаны конкретные способы модернизации систем мониторинга. Наиболее перспективным способом решения данной задачи является создание автоматизированной системы диагностики электрохимической коррозии подземных элементов крепления опор порталного типа.

В работе [7] учеными Познанского технического университета Sroka K., Złotecka D. выполнен анализ отключений электроэнергии в Азии. На долю отключений по техническим причинам приходится 44%, на долю природных явлений приходится 24% от количества всех отключений. На территории Российской Федерации и СНГ

наблюдается ежегодный прирост отключений по вине повреждения опор из-за старения воздушных линий электропередач [2].

В Республике Казахстан Бапин Е. в работе [8] провел наиболее полный анализ аварийных отключений воздушных линий электропередач напряжением 220 кВ и выше, на основе данных системного оператора единой электроэнергетической системы КЕГОС в период с 2013 по 2018 гг. В таблице приведена протяженность воздушных линий электропередач, по данным на 2018 год.

Следует отметить, что в настоящее время воздушные линии электропередач напряжением 330 кВ и 1150 кВ работают на напряжение 220 кВ и 500 кВ соответственно.

Причины кратковременных и продолжительных аварийных отключений воздушных линий электропередач в Республике Казахстан приведены на рисунке.

Проведя анализ причин аварийных отключений, можно сделать вывод, что основными причинами являются погодные условия, а технические – второстепенные. Следует отметить, что наличие конструктивных дефектов приводит к продолжительным восстановительным работам.

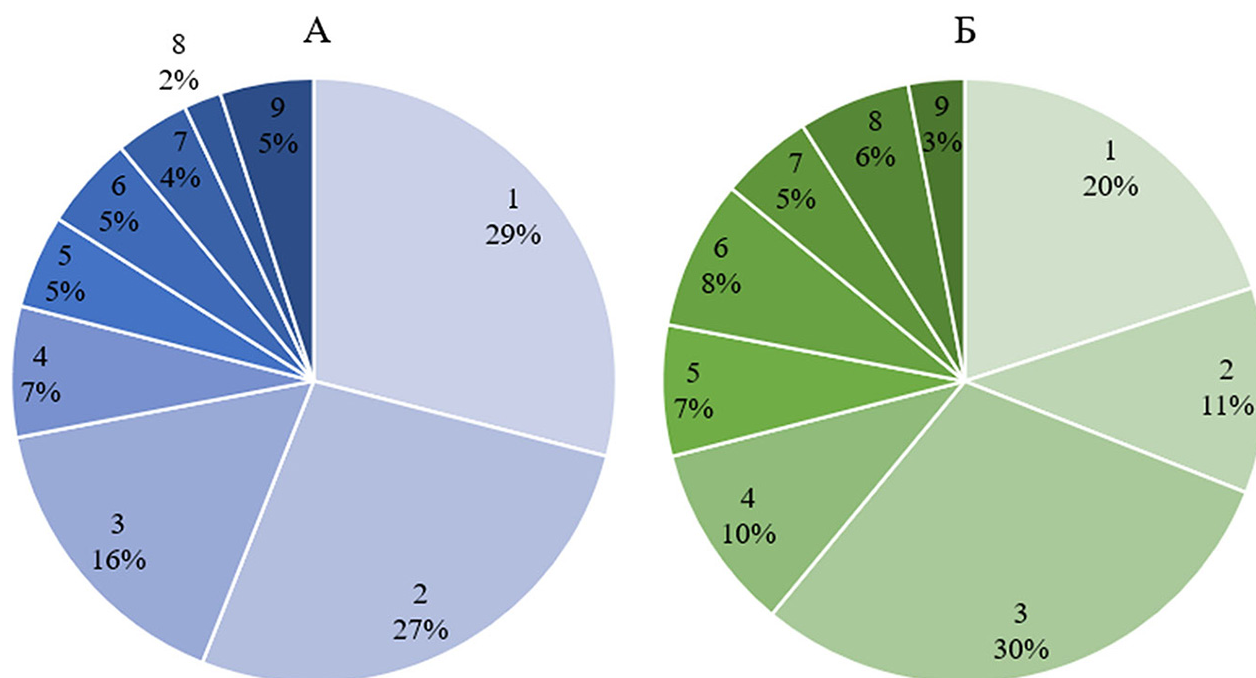
К техническим причинам относятся повреждения гирлянд изоляторов, линейной арматуры, тросов, проводов и опор. Основным фактором повреждения опор является коррозия подземных элементов крепления. Организация АО «НТЦ ФСК ЕЭС» провела и предоставила в работе [9] анализ причин повреждений воздушных линий электропередач с 1997 по 2007 гг. Основными причинами аварийных отключений на воздушных линиях электропередач в СНГ является повреждение проводов (50%) и изоляторов (30%). Но наиболее крупные финансовые затраты и длительные восстановительные работы наблюдаются при устранении результатов воздействия электрохимической коррозии и нарушении целостности подземных элементов конструкции воздушных линий электропередач 220-500 кВ (3%).

В работах [8] и [9] недостаточно раскрыты причины повреждений опор, которые приводят к долгосрочным отключениям.

Опоры воздушных линий электропередач порталного типа имеют ряд конструктивных особенностей, которые оказывают существенное влияние на надежность функционирования опоры и всей линии. Так, узлы крепления опор располагаются под землей и в процессе эксплуатации наиболее подвержены электрохимической коррозии [2]. Узлы крепления опор порталного типа состоят из тросовых оттяжек, U-образных болтов и железобетонных плит. Тросовые оттяжки располагаются на поверхности земли и соединяют траверсу опоры с U-образным болтом. U-образный болт соединяется с металлической петлей железобетонной плитой, которая располагается на глубине не менее 2,5 м от поверхности земли.

Наиболее подверженными электрохимиче-

Протяженность воздушных линий электропередач в Республике Казахстан	
Напряжение	Протяженность, км
220 кВ	14694
220 кВ (в габарите 330 кВ)	1864,1
500 кВ	8288
500 кВ (в габарите 1150 кВ)	1421,2
Итого	26267,3



А – кратковременные аварийные отключения; Б – продолжительные аварийные отключения;  
 1 – удары молнии; 2 – повреждение изоляторов; 3 – влияние сильного ветра; 4 – пляска проводов; 5 – обледенение;  
 6 – лесные пожары; 7 – человеческий фактор; 8 – конструктивные дефекты опоры; 9 – другие  
**Причины аварийных отключений воздушных линий электропередач [8]**

ской коррозии элементами в данном узле крепления опор portalного типа является U-образный болт и металлическая петля железобетонной плиты [10].

Скорость электрохимической коррозии металлических элементов крепления опор зависит от агрессивности грунтов и наличия блуждающих токов. Агрессивность грунтов, по отношению к металлическим изделиям, зависит от типа и структуры грунта, вида и концентрации солей, pH, наличия кислорода, влажности, температуры, наличия бактерий, воздействия переменных механических напряжений, удельного электрического сопротивления. В настоящее время удельное электрическое сопротивление является определяющим фактором для косвенной оценки степени агрессивности грунта по отношению к металлическим элементам крепления опор [11].

Согласно проведенной оценке степени агрессивности грунтов, можно выделить наиболее опасные участки воздушной линии электропередач, которые больше подвержены электрохимической коррозии. Так как факторы, определяющие агрессивность грунта, изменяются с течением времени и нет прямой зависимости между агрессивностью грунта и электрохимической коррозии, прогнозировать остаточный ресурс элементов крепления опор невозможно.

Учеными Шишковой К.А., Астаповым А.Ю. из Мичуринского государственного аграрного университета (Россия) в работе [12] предлагается использовать для контроля состояния элементов конструкции опор воздушных линий электропередач беспилотные летательные аппараты. В связи с особенностями рельефа и климата в Республике Казахстан использование беспилотных

летательных аппаратов затруднено. Основной причиной является большое количество ветреных дней в году с сильными порывами, в данных условиях не рекомендовано проводить полеты. Данный способ не позволяет мониторить состояние узлов крепления опор, расположенных под землей. С помощью беспилотных летательных аппаратов можно диагностировать разрушение крепления оттяжек лишь косвенно, по изменению натяжения оттяжек, вследствие полного разрушения узла.

#### **Методы диагностики металлических элементов крепления опор**

В настоящее время в Республике Казахстан используется метод визуального осмотра металлических элементов крепления опор со вскрытием грунта по всей длине воздушной линии электропередач, так как отсутствуют автоматизированные системы мониторинга. Замену узла крепления опоры нормативно рекомендовано производить при потере сечения в 20% от заводских значений. Однако организации, которые занимаются эксплуатацией и обслуживанием воздушных линий напряжением 220-500 кВ, для уменьшения риска возникновения аварийных отключений по причине электрохимической коррозии узлов крепления опор порталного типа проводят работы по их замене одновременно на всех опорах по всей длине воздушной линии электропередач. Данные мероприятия производятся с долгосрочными отключениями от электроэнергии крупных промышленных зон и, как следствие, несут крупные финансовые расходы.

Метод косвенной оценки электрохимической коррозии подземных металлических элементов крепления опор, основанный на использовании пробного точечного электрода, был предложен Тарасовым А.Г. [13].

Данный метод позволяет оценить степень агрессивного воздействия всех факторов, влияющих на коррозию точечного электрода, который находится непосредственно возле исследуемого объекта и на него оказывают влияние те же агрессивные воздействия. Но он позволяет лишь косвенно судить о состоянии узла крепления опоры, что ведет к сравнительно большой погрешности и не позволяет оценить остаточный ресурс.

Для оценки коррозионного состояния металлических элементов применяется метод ультразвуковой дефектоскопии. Он позволяет определить наиболее подверженные коррозии места узлов крепления опор, но специфика коррозии узлов крепления опор заключается в том, что коррозии подвержена только поверхность металлического изделия. Поэтому применение ультразвуковой дефектоскопии для определения остаточного ресурса на ранних стадиях коррозии не целесообразно.

На основе эффекта магнитоластики основан метод определения коррозионного состояния ме-

таллических элементов крепления опор, расположенных под землей, – метод магнитной памяти металла. Данный метод позволяет оценить степень электрохимической коррозии и определить структуру металла [14].

Существенным недостатком применения ультразвукового метода и метода магнитной памяти металла является то, что для оценки коррозионного состояния узлов крепления опоры необходимо провести вскрытие грунтов.

В Сибирском государственном университете водного транспорта (Новосибирск, Россия) Кузнецов А.Ю. в работе [10] предоставил результаты экспериментальных исследований электромагнитных методов оценки состояния узлов крепления оттяжек опор воздушных линий. Были проведены исследования вихревого метода оценки коррозионного состояния. В основе метода стоят отличные свойства металла от свойств продуктов коррозии. Коррозионный слой принимается как диэлектрик с потерями. В процессе исследований металлическая петля представляет собой высокочастотную линию связи, в которой наступает резонанс (при целом числе полуволн).

При намагничивании ферромагнетика в металлической петле железобетонной плиты возникают вихревые токи. При этом небольшая часть энергии рассеивается. Потери мощности, обусловленные вихревыми токами, зависят от состояния петли [10].

Так как коррозия металлической плиты происходит неравномерно, изменение потерь мощности при изменении объема вихревых токов маловероятно.

В последнее время получили распространение методы оценки коррозионного состояния металлических элементов крепления опор, основанные на измерении сопротивления. Измерение сопротивления на постоянном токе для элементов крепления опор не применимо из-за небольшого сечения и сопротивления в десятые доли Ома. Целесообразнее применять переменный ток высокой частоты, основанный на явлении «скин-эффекта». В данном случае ток протекает по поверхности металлического элемента крепления опор. Так как необходимо контролировать поверхностный слой металлических элементов, следовательно, данный метод наиболее перспективен.

Данный метод применим для оценки остаточного ресурса U-образного болта. Для оценки металлической петли железобетонной плиты данный метод не применим, так как необходимо подключение прибора непосредственно к петле.

Для диагностики металлической петли железобетонной плиты узла крепления опоры Чураков А.А. в работе [15] предлагает использовать метод поверхностных волн. Метод основан на использовании генератора сверхвысокой частоты, который создает в петле, в момент резонанса, поверхностную стоячую волну. По данным затухания поверхностной электромагнитной волны

в коррозионном слое можно судить о потере сечения металлической петли. Необходимо учитывать, чтобы целое число полуволн уложилось по длине металлической петли. В данной работе недостаточно полно описана теоретическая часть, для более полного понимания происходящих физических процессов необходимо разработать математическую модель объекта исследования с первичным преобразователем.

Использование прибора [15] для автоматизированного удаленного мониторинга подземных металлических элементов крепления опор невозможно из-за крупных габаритов, высокого электропотребления и отсутствия решений для передачи полученных измерений.

Для оценки остаточного ресурса элементов крепления опор, расположенных под землей, применение электромагнитных методов с использованием поверхностной стоячей волны является наиболее экономически целесообразным, не зависит от взаиморасположения U-образных болтов и искусственных заземлителей, не требует отключения линии и выполнения диагностики со вскрытием грунтов.

### Выводы

Для повышения эффективности функционирования, уменьшения аварийности и повышения надежности энергетической системы Республики Казахстан при передаче и распределении электроэнергии необходимо выполнять автоматизированный удаленный мониторинг состояния элементов крепления опор, расположенных под землей. Для достижения этой задачи необходимо выполнить следующий этап исследований:

- разработать математическую модель объекта исследования с первичным преобразователем с использованием волновых методов диагностики;
- разработать рекомендации для построения контрольно-индикационных датчиков с преобразователем;
- разработать алгоритмы энергосбережения источников электропитания информационной части при передаче информации с контрольно-индикационных датчиков интенсивности электрохимической коррозии на диспетчерский пункт;
- разработать структуру и принципы передачи информации с опор на диспетчерский пункт.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития АО «KEGOC» на 2022-2031 годы. – URL: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/cb4/cb4c79f0da9c701a48a2d33309bf53c1.pdf>. Дата посещения: 16.11.2022 г.
2. Absimetov V.A., Saltanova E.V. Deterioration of Power Transmission Line Supports and Development of Proposals for Increasing their Durability // International Scientific Conference on Innovations and Technologies in Construction. – Springer, Cham, 2021. – Pp. 309-314.
3. Rahman K.M.J., Munnee M.M., Khan S. Largest blackouts around the world: Trends and data analyses // 2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE). – IEEE, 2016. – Pp. 155-159.
4. Veloza O.P., Santamaria F. Analysis of major blackouts from 2003 to 2015: Classification of incidents and review of main causes // The Electricity Journal. – 2016. – Т. 29. – No. 7. – Pp. 42-49.
5. Jufri F.H., Widiputra V., Jung J. State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: Definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies // Applied energy. – 2019. – Т. 239. – Pp. 1049-1065.
6. Haes Alhelou H. et al. A survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges // Energies. – 2019. – Т. 12. – No. 4. – P. 682.
7. Sroka K., Złotecka D. The risk of large blackout failures in power systems // Archives of Electrical Engineering. – 2019. – Pp. 411-426.
8. Vapin Y. et al. Outage Data Analysis of the Overhead Transmission Lines in Kazakhstan Power System // 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). – IEEE, 2020. – Pp. 1-6.
9. Ефимов Е.Н., Тимашова Л.В., Ясинская Н.В. Причины и характер повреждаемости компонентов воздушных линий электропередачи напряжением 110-750 кВ в 1997-2007 гг. // Энергия единой сети. – 2012. – No 5. – С. 32-41.
10. Кузнецов А.Ю. Экспериментальная проверка методов оценки состояния узлов крепления оттяжек опор воздушных линий в электроэнергетических системах // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – No 3. – С. 83-85.
11. Arriba-Rodriguez L. et al. Methods to evaluate corrosion in buried steel structures: a review // Metals. – 2018. – Т. 8. – No. 5. – P. 334.
12. Шишкова К.А., Астапов А.Ю. Мониторинг линий электропередач беспилотными летательными аппаратами // Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК. – 2017. – С. 283-287.
13. Патент № 2299421 С2 Российская Федерация, МПК G01N 17/02. Способ определения коррозионного состояния металлических элементов анкерного узла оттяжек опор: № 2005119527/28: заявл. 16.06.2005: опубл. 20.05.2007 / А.Г. Тарасов. – EDN TQHVPP.
14. Чистякова А.В., Орлов В.А., Чухин В.А. Диагностика технического состояния металлических трубопроводов // Природообустройство. – 2016. – No 2. – С. 48-54.
15. Патент на полезную модель № 87020 U1 Российская Федерация, МПК G01N 22/02. Устройство для измерения коррозии методом поверхностной электромагнитной волны: № 2009123142/22: заявл. 17.06.2009: опубл. 20.09.2009 / А.А. Чураков, Ю.В. Демин, А.И. Мозилев. – EDN GXDEGY.

**Кернеуі 220-500 кВ әуе электр желілеріндегі электрхимиялық коррозияны диагностикалау әдістерін талдау**

<sup>1</sup>ТАРАН Николай Юрьевич, докторант, 1814n97@mail.ru,

<sup>1\*</sup>КАЛИНИН Алексей Анатольевич, PhD, кафедра меңгерушісі, leokalinin@mail.ru,

<sup>1</sup>КАВЕРИН Владимир Викторович, т.ф.к., профессор м.а., kaverinkz@inbox.ru,

<sup>2</sup>САРСИКЕЕВ Ермек Жасланұлы, PhD, кафедра меңгерушісі, sarsikeev.ermek@yandex.ru,

<sup>1</sup>«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

<sup>2</sup>«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Қазақстан, Астана, Жеңіс даңғылы, 62,

\*автор-корреспондент.

**Аңдатпа.** Энергетика саласындағы ірі әлемдік авариялық жағдайларға және Қазақстан Республикасындағы кернеуі 220-500 кВ әуе электр беру желілеріндегі авариялық ажыратулардың себептеріне талдау жасалды. Зерттеулер портал түріндегі тіректердің дизайн ерекшеліктеріне әсер етеді. Жоғары вольтты әуе электр желілері тіректерінің осал тораптарының электрхимиялық коррозиясының себептері анықталды. Жер астында орналасқан портал типті тіректерді бекітудің металл элементтерінің қалдық ресурсын диагностикалау әдістерінің ерекшеліктері қарастырылады. Қашықтықтан мониторинг жүйесін құру және Қазақстан Республикасында электр берілістерінің әуе желілерінде қолдану үшін неғұрлым перспективалы әдістер ұсынылды. Әрі қарай зерттеу үшін ұсыныстар берілген.

**Кілт сөздер:** әуе электр желісі, портал типті тіректер, диагностикалық әдістер, сенімділік, электрхимиялық коррозия, U-болт.

**Analysis of Diagnostic Methods for Electrochemical Corrosion on Overhead Power Lines With a Voltage of 220-500 kV**

<sup>1</sup>TARAN Nikolay, Doctoral Student, 1814n97@mail.ru,

<sup>1\*</sup>KALININ Alexey, PhD, Head of Department, leokalinin@mail.ru,

<sup>1</sup>KAVERIN Vladimir, Cand. of Tech. Sci., Acting Professor, kaverinkz@inbox.ru,

<sup>2</sup>SARSIKEEV Ermek, PhD, Head of Department, sarsikeev.ermek@yandex.ru,

<sup>1</sup>NPJSC «Abylqas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

<sup>2</sup>NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University», Kazakhstan, Astana, Zhenis Avenue, 62,

\*corresponding author.

**Abstract.** The analysis of major global emergency situations in the energy sector and the causes of emergency outages on overhead power lines with a voltage of 220-500 kV in the Republic of Kazakhstan has been carried out. The research touches upon the design features of portal-type supports. The causes of electrochemical corrosion of vulnerable nodes of supports of high-voltage overhead power lines are disclosed. The features of methods of diagnostics of the residual resource of metal elements of fastening of portal-type supports located underground are considered. The most promising methods for creating a remote monitoring system and application on overhead power lines in the Republic of Kazakhstan are recommended. Recommendations for further research are given.

**Keywords:** overhead power line, portal type supports, diagnostic methods, reliability, electrochemical corrosion, U-shaped bolt.

## REFERENCES

1. Strategiya razvitiya AO «KEGOC» na 2022-2031 gody. – URL: <https://www.kegoc.kz/upload/iblock/cb4/cb4c79f0da9c701a48a2d33309bf53c1.pdf>. Data poseshcheniya: 16.11.2022 g.
2. Absimetov V.A., Saltanova E.V. Deterioration of Power Transmission Line Supports and Development of Proposals for Increasing their Durability // International Scientific Conference on Innovations and Technologies in Construction. – Springer, Cham, 2021. – Pp. 309-314.
3. Rahman K.M.J., Munnee M.M., Khan S. Largest blackouts around the world: Trends and data analyses // 2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE). – IEEE, 2016. – Pp. 155-159.
4. Veloza O.P., Santamaria F. Analysis of major blackouts from 2003 to 2015: Classification of incidents and review of main causes // The Electricity Journal. – 2016. – T. 29. – No. 7. – Pp. 42-49.
5. Jufri F.H., Widiputra V., Jung J. State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: Definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies // Applied energy. – 2019. – T. 239. – Pp. 1049-1065.

6. Haes Alhelou H. et al. A survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges // *Energies*. – 2019. – Т. 12. – No. 4. – P. 682.
7. Sroka K., Złotecka D. The risk of large blackout failures in power systems // *Archives of Electrical Engineering*. – 2019. – Pp. 411-426.
8. Bapin Y. et al. Outage Data Analysis of the Overhead Transmission Lines in Kazakhstan Power System // *2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAAPS)*. – IEEE, 2020. – Pp. 1-6.
9. Efimov E.N., Timashova L.V., YAsinskaya N.V. Prichiny i harakter povrezhdaemosti komponentov vozdushnyh linij elektroperedachi napryazheniem 110-750 kV v 1997-2007 gg. // *Energiya edinoj seti*. – 2012. – No. 5. – Pp. 32-41.
10. Kuznecov A.YU. Eksperimental'naya proverka metodov ocenki sostoyaniya uzlov krepleniya ottызhek opor vozdushnyh linij v elektroenergeticheskikh sistemah // *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. – 2015. – No. 3. – Pp. 83-85.
11. Arriba-Rodriguez L. et al. Methods to evaluate corrosion in buried steel structures: a review // *Metals*. – 2018. – Т. 8. – No. 5. – P. 334.
12. SHishkova K.A., Astapov A.YU. Monitoring linij elektroperedach bespilotnymi letatel'nymi apparatami // *Inzhenernoe obespechenie innovacionnyh tekhnologij v APK*. – 2017. – Pp. 283-287.
13. Patent No. 2299421 C2 Rossijskaya Federaciya, MPK G01N 17/02. Sposob opredeleniya korrozionnogo sostoyaniya metallicheskih elementov ankernogo uzla ottызhek opor: No. 2005119527/28: zayavl. 16.06.2005: opubl. 20.05.2007 / A.G. Tarasov. – EDN TQHVPP.
14. CHistyakova A.V., Orlov V.A., CHuhin V.A. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya metallicheskih truboprovodov // *Prirodoobustrojstvo*. – 2016. – No. 2. – Pp. 48-54.
15. Patent na poleznuyu model' No. 87020 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01N 22/02. Ustrojstvo dlya izmereniya korrozii metodom poverhnostnoj elektromagnitnoj volny: No. 2009123142/22: zayavl. 17.06.2009: opubl. 20.09.2009 / A.A. CHurakov, YU.V. Demin, A.I. Mozilov. – EDN GXDEGY.