

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.09

УДК 620.09

Я.С. Ульман, С.А. Ганджа, Д.В. Коробатов,
Е.М. Лекерова, М.С. Козлов

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РЕШЕНИЯ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СПОСОБА ОЧИСТКИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ОТ НАЛЕДИ

Сегодня существует проблема защиты воздушных линий электропередач (ВЛЭП) от образования наледи. Она остается актуальной для регионов с влажным зимним климатом и значительным количеством осадков. При существующих многочисленных методах борьбы с наледью, применяемых на практике, пока что ни один из них в полной мере не удовлетворяет сетевые компании, эксплуатирующие это оборудование. Как правило, для устранения гололёда используется плавка постоянным током, однако это неэкономично. **Цель исследования:** на основе анализа и критики существующих методов очистки ВЛЭП от наледи предложить надежный и экономичный способ решения этой проблемы. **Методы:** для достижения поставленной цели использовался алгоритм решения изобретательских задач (АРИЗ), разработанный и подробно изложенный советским изобретателем Г.С. Альтшуллером в его трудах, посвященных теории решения изобретательских задач (ТРИЗ). **Результаты:** на основе алгоритмических шагов АРИЗ выявлено основное техническое противоречие системы, определены внутренние и внешние ресурсы, сформулирован идеальный конечный результат (ИКР), конкретизированы параметры вводимого в систему дополнительного X-элемента, предложено несколько вариантов конструктивного выполнения этого элемента. Рассмотрены такие способы, как: применение гидрофобной изоляции, привода на базе асинхронного двигателя с экранированными полюсами, вибрационного привода с распорками между проводами, привода на основе электромагнита, расположенного между изолятором и проводом. Проведён анализ каждого способа и выбран наиболее оптимальный. В качестве основного устройства, имеющего наибольшую надежность и экономичность для внедрения в практику, рекомендован привод на основе электромагнита, расположенного между изолятором и проводом. **Практическая значимость:** предложена концепция устройства борьбы с наледью, которое представляет собой вибрационный электромагнит, создающий колебательное воздействие на провод. При этом, с одной стороны, исключается возможность образования наледи в условиях высокой влажности и низких температур, с другой стороны, происходит механическое очищение ВЛЭП, если иней уже осел на провода. Устройство может работать в автоматическом режиме от датчиков влажности и температуры и в автоматизированном режиме по команде оператора. **Обсуждение:** предложенный способ относится к механическим методам очистки ВЛЭП, но в отличие от существующих устройств этого типа, таких как роботизированные устройства, перемещающиеся между пролетами, привод с микродвигателем, который вращает фрезу и движется вдоль провода, раскачивания провода между пролетами, конструкция предлагаемого устройства более простая, дешевая и надежная. Она не требует отключения линии от потребителя во время очистки, специального технического обслуживания, привлечения для функционирования дополнительного персонала. Внедрение данного предложения в практику эксплуатации ВЛЭП позволит существенно сократить число случаев аварийных отключений по причине гололедообразования, что снизит материальный ущерб от недоотпуска электроэнергии и затрат на ремонт электрооборудования.

Ключевые слова: линия электропередачи, обледенение, теория решения изобретательских задач, алгоритм решения изобретательских задач, вибрационный электромагнит.

**I.S. Ulman, S.A. Gandzha, D.V. Korobatov,
E.M. Lekerova, M.S. Kozlov**

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

APPLICATION OF THE THEORY OF SOLVING INVENTIVE PROBLEMS FOR THE DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CLEANING POWER LINES FROM ICE

Today there is a problem of protecting overhead power lines from the formation of ice. It remains relevant for regions with a humid winter climate and a significant amount of precipitation. With the existing numerous methods of combating ice applied in practice, so far none of them fully satisfies the network companies operating this equipment. As a rule, direct current melting is used to eliminate ice, but this is not economical. **The purpose of the study:** based on the analysis and criticism of existing methods of cleaning overhead lines from ice, to offer a reliable and economical way to solve this problem. **Methods:** to achieve this goal, an Algorithm for Solving Inventive Problems (ASIP) was used, developed and described in detail by the Soviet inventor Altshuller G.S. in his works on the theory of solving inventive problems (TSIP). **Results:** based on the algorithmic steps of ARIZ, the main technical contradiction of the system was revealed, internal and external resources were determined, the ideal final result was formulated, the parameters of the additional X-element introduced into the system were specified, several options for the constructive implementation of this element were proposed. The following methods are considered: the use of hydrophobic insulation, a drive based on an asynchronous motor with shielded poles, a vibration drive with spacers between wires, an electromagnet-based drive located between the insulator and the wire. An analysis of each method was carried out and the most optimal one was selected. A drive based on an electromagnet located between an insulator and a wire is recommended as the main device having the greatest reliability and cost-effectiveness for implementation into practice. **Practical significance:** the concept of an anti-ice device is proposed, which is a vibrating electromagnet that creates an oscillatory effect on the wire. At the same time, on the one hand, the possibility of ice formation in conditions of high humidity and low temperatures is excluded, on the other hand, mechanical cleaning of the overhead line occurs if the frost has already settled on the wires. The device can operate in automatic mode from humidity and temperature sensors and in automated mode at the operator's command. **Discussion:** the proposed method relates to mechanical methods of cleaning overhead lines, but unlike existing devices of this type, such as robotic devices moving between spans, a drive with a micro-motor that rotates the cutter and moves along the wire, the swing of wires between spans, the design of the proposed device is simpler, cheaper and reliable. It does not require disconnecting the line from the consumer during cleaning, special maintenance, or the involvement of additional personnel for the operation. The introduction of this proposal into the practice of operating overhead lines will significantly reduce the number of cases of emergency shutdowns due to ice formation, which will reduce material damage from under-supply of electricity and the cost of repairing electrical equipment

Keywords: power transmission line, icing, theory of inventive problem solving, algorithm for solving inventive problems, vibrating electromagnet.

Введение

При эксплуатации воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) в ряде регионов с влажным климатом возникает проблема образования наледи на проводах и других конструкциях в зимний период. При этом вес обледеневших проводов возрастает в несколько раз, а толщина слоя льда

достигает иногда до 100 мм. Наличие гололеда обуславливает дополнительные механические нагрузки на все элементы воздушных линий. При значительных гололедных отложениях возможны обрывы проводов, тросов, разрушения арматуры, изоляторов и даже опор воздушных линий. Согласно статистическому анализу [1], на территории Российской Федерации в 2017–2018 гг. произошло 503 случая аварийных отключений по причине гололёдообразования. Это 14,78 % от общего числа аварий за этот период, что привело к большим материальным затратам из-за недопоставки электроэнергии и восстановления электрооборудования. Среднее время ликвидации гололедных аварий превышает среднее время ликвидации аварий, вызванных другими причинами, в 10 и более раз. В настоящее время происходит общее увеличение протяжённости линий электропередачи, в том числе и в опасных по гололёду районах, что приводит к возрастанию количества аварий, несмотря на увеличение контрольных мероприятий по предотвращению аварий из-за обледенения. Сильный снег и налипание мокрого снега занимают 3-е место по статистике среди всех опасных гидрометеорологических явлений. Мировая и отечественная практика показывает, что, несмотря на значительное привлечение интеллектуальных сил и материальных средств, на настоящий момент так и не создано эффективного и экономичного способа защиты линий электропередач от наледи, что свидетельствует об актуальности этой проблемы. Всё это поднимает вопрос о разработке эффективного и дешёвого метода предотвращения образования наледи на проводах. В данной статье приводятся результаты исследований авторов по этой проблеме с последующими конкретными предложениями. Для анализа задачи и нахождения приемлемого решения были использованы основные положения теории решения изобретательских задач, в частности, алгоритм решения изобретательских задач.

1. Состояние проблемы на данный момент

Анализ отечественных и зарубежных источников показывает, что наиболее распространёнными способами борьбы являются тепловое воздействие на налесь [2,3], механические способы очистки [4] и комбинация этих методов [5]. На рис. 1 приведена классификация существующих методов борьбы с наледью.

Методы термического воздействия на налесь имеют следующие проблемы, перечисленные ниже.

Необходимость применения дорогостоящего мощного специального оборудования и, как следствие, затраты на электропитание.

Заземляющие устройства, используемые в схемах, не рассчитаны на длительное протекание тока около 2 кА.

Дорогостоящее оборудование используется лишь небольшой промежуток времени для устранения или профилактики наледи. В остальное время оно не используется и является балластом энергосистемы. Как правило, для устранения этого недостатка, предлагаются различные схемы модернизации. Например, использование агрегата дополнительно как компенсатора реактивной энергии, однако это ведёт к его удорожанию и техническому усложнению.

Воздушные линии (ВЛ) покрываются наледью неравномерно (по опыту эксплуатации от 7 до 30 % от длины нагреваемого участка), из чего следует лишний нагрев тех участков, на которых отсутствует ледяная корка, что неэкономично. Для устранения этого недостатка применяют мобильные генераторы для плавки гололёда, которые подключаются к проводам и обеспечивают плавку на длине двух пролётов. Однако для этого необходимы: выезд бригады на место плавки, отключение линии и время на проведение работ. Есть методы, которые пытаются обойти эту проблему, такие как плавка пульсирующим током, током высокой частоты (нагревает лишь на 10–20 град и используется лишь как профилактика наледи), однако эти методы не устраняют недостатки.



Рис. 1. Классификация методов борьбы с наледью на воздушных линиях электропередачи

Электромеханическое воздействие основано на механических колебаниях провода под действием силы Ампера, возникающей при пропускании тока. На практике для достижения этого эффекта нужен очень точный расчёт уровня и частоты импульсов тока для исключения возможных негативных последствий резонанса. Также этот способ подразумевает отключение линии, хотя и является более быстрым по сравнению с термическими, соответственно, более дешёвым при применении.

Механические способы борьбы [4, 5] с гололёдом, как правило, имеют низкую эффективность и достаточно дороги. Если рассматривать роботов или устройства вибрационного воздействия, то их существенный недостаток заключается в том, что они действуют лишь на один пролёт одной линии. Роботу далее необходимо вмешательство человека, чтобы перебраться на другой пролёт. Существующие вибрационные устройства необходимо размещать на каждой линии каждого пролёта, что достаточно трудоёмко и дорого.

Часть методов борьбы с наледью, которые не вошли в представленную классификацию, направлена на подбор для проводов специальных материалов, например гидрофобных [6]. Провода покрывают водоотталкивающим веществом, на которое осадки прилипают значительно хуже, однако они дороже обычных из-за более сложного технологического процесса, это ведёт к значительному удорожанию ВЛ. При этом остаётся нерешённой проблема уже существующих линий. Замена существующих проводов на новые с покрытием ведёт к колоссальным затратам для сетевых компаний, а способа эффективно наносить долговременное водоотталкивающее покрытие на существующие ВЛЭП нет.

В последнее время предпринимаются попытки использования композитных проводов [6–8]. Сами по себе провода не устраняют налипание снега, но при этом они обладают повышенной прочностью, что в регионах, где проблема гололёда стоит не слишком остро, вполне приемлемо. Снег, хотя и налипает на провод, но прочности провода достаточно для того, чтобы не нанести повреждения электрооборудованию. Однако в более опасных регионах это не является решением проблемы. Кроме этого эти провода имеют высокую цену, что мешает их свободному применению.

Таким образом, проблема устранения наледи на линиях электропередач частично решается. Некоторые методы вошли в практику применения, однако ни один из существующих способов не устраивает

крупные сетевые компании из-за вышеперечисленных недостатков. Часто компании идут на риск, пренебрегая возможными авариями, возникающими вследствие обледенения. Это означает, что требуется разработать новый, более эффективный и экономичный способ борьбы с гололёдом.

2. Применение теории решения изобретательских задач для поиска технического решения

Большинство научного сообщества признает постулат о том, что технические системы развиваются по объективным законам через разрешение технических противоречий, находящихся в самой технической системе. Задачи исследователей – изучение законов развития конкретной системы и принятие технических решений, которые соответствовали бы этим закономерностям. Наиболее конкретно и понятно закономерности развития технических систем были сформулированы группой российских ученых под руководством Г.С. Альтшуллера в так называемой теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) [9–13]. ТРИЗ является методом решения технических задач и усовершенствования технических систем. В настоящее время ТРИЗ доказал свою эффективность в российской и зарубежной практике на примере развития большого количества технических систем из различных сфер.

Основным инструментом ТРИЗ является алгоритм решения изобретательских задач (АРИЗ), который позволяет на основе конкретных шагов провести анализ технической системы и на основе этого анализа сформулировать решение технической задачи, которое соответствовало бы общей тенденции развития технической системы (ТС). Воспользуемся этим инструментом для решения нашей задачи по борьбе с наледью на проводах.

Первым шагом в алгоритме являются запись конкретного условия задачи и выделение основных технических противоречий (ТП). Для этого надо проанализировать ТС с точки зрения имеющихся в ней элементов, их взаимодействия и на основе этого анализа сформулировать задачу с точки зрения наличия существующих технических противоречий.

Сформулируем задачу следующим образом, учитывая рекомендации ТРИЗ: техническая система для передачи электричества включает проводник, электричество, наледь. Техническое противоречие первого типа (ТП-1): если в системе находится провод, то он может передавать

энергию, но при этом провод находится в условиях, когда на нём образуется гололёд. Техническое противоречие второго типа (ТП-2): если провод отсутствует, то гололёд не возникает, но тогда отсутствует возможность передачи электроэнергии. Необходимо при минимальных изменениях самой технической системы «провод–электричество–наледь» обеспечить отсутствие налипания наледи на провода. Исходя из формулировок технических противоречий, сразу видно, что ТП-2 для дальнейшего рассмотрения и поиска решения не подходит, так как система теряет основное свое функциональное назначение: без провода передавать энергию невозможно. По правилам ТРИЗ будем рассматривать только ТП-1 [11].

При выполнении следующего шага АРИЗ необходимо выделить и закрепить конфликтующую пару элементов: изделие и инструмент. Исходя из принятой терминологии, в нашей задаче в качестве изделия примем провод, а в качестве инструмента – наледь. При использовании терминов «вещество», «поле» будем понимать их в определениях, которые даёт ТРИЗ [11].

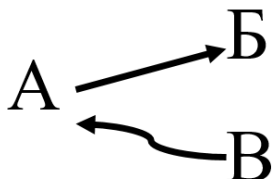


Рис. 2. Схема конфликта

Для полного и наглядного понимания конфликта в ТС составим его графическую схему. На рис. 2 приняты следующие обозначения: А – проводник, Б – электричество, В – лёд. Положительную связь в схеме конфликта обозначим сплошной стрелкой, вредное воздействие обозначим волнистой стрелкой. Под схемой конфликта понимается наглядное изображение взаимодействия тех элементов системы, которые оказывают наиболее значимое влияние на её работоспособность и конфликт, который необходимо устранить. Таким образом, А положительно действует на Б, но В отрицательно действует на А. Влияние электрического поля на налипание снега учитывать не будем, так как и без этого влияния количество наледи на проводе приводит к аварийным ситуациям [7]. Чтобы усилить конфликт и обострить главные противоречия, будем считать, что провод всегда находится в «состоянии» намерзания гололёда.

Сформулируем модель задачи. Дана конфликтующая пара – провод и наледь. Провод необходим для электроснабжения, но на нём постоянно намерзает лёд. Необходимо **найти такой дополнительный X-элемент, который бы устранил намерзание льда на проводе и при этом не нарушил** электроснабжение.

Следующим шагом АРИЗ является определение оперативной зоны, т.е. пространства, в пределах которого возникает конфликт, указанный в модели задачи, и оперативного времени действия конфликта. Оперативной зоной является поверхность провода. Для определения оперативного времени (ОВ) разделим провод на два состояния. Первое состояние – это состояние конфликта, когда нахождение ледяных образований на проводе непосредственно угрожает сохранности системы, т.е. масса льда переходит за критическое значение и может вызвать механическое повреждение системы. Второе состояние – это время до конфликта, когда наледи нет или её вес мал и не может привести к поломке. Таким образом: T1 – время конфликта, нахождение наледи на проводнике; T2 – время до конфликта – намерзание наледи.

В соответствии с рекомендациями АРИЗ выделим вещественно-полевые ресурсы (ВПР) в рассматриваемой системе.

В качестве внутрисистемных ВПР можно выделить следующие ресурсы: электромагнитное поле, провод, лёд, тепловое поле от провода. В качестве внешне-системных ВПР выделим: столб, изоляторы, опоры. В надсистемные ВПР можно включить: ветер, гравитационное поле, воздушное пространство вокруг провода.

Проанализировав ресурсы и сформулировав задачу по рекомендациям АРИЗ, следует определить идеальный конечный результат (ИКР), который должен обострить выбранное на основе ТП-1 физическое противоречие (ФП). На практике не всегда возможно достичь ИКР, но ИКР указывает направление наиболее сильного решения. ИКР-1: «X-элемент, абсолютно не усложняя систему и не вызывая вредных явлений, устраняет наледь в течение времени T2 в пределах поверхности провода, сохраняя способность изделия (провода) передавать электричество». По рекомендациям АРИЗ, усилим формулировку ИКР-1 дополнительным требованием: в систему нельзя вводить новые вещества и поля, необходимо использовать внутренние вещественно-полевые ресурсы (ВПР).

Сформулируем ФП на макро и микроуровнях. На макроуровне формулировка будет иметь вид: «Поверхность провода в течение времени намерзания наледи (Т2) должна располагаться вокруг провода, не затрудняя передачу тока, и не должна накапливать на себе снег/наледь, чтобы не утяжелять провод весом наледи». На микроуровне: «На поверхности провода должны быть частицы вещества, которые изолируют проводник (в случае ВЛЭП ими является окружающий воздух), чтобы обеспечить нормальную работу системы, и не должны быть частицы вещества, на котором накапливается снег, чтобы сохранить нормальный вес провода».

Выявив физические противоречия, запишем ИКР-2 для уточнения решения. ИКР-2: «Поверхность провода в течение времени намерзания наледи (Т2) должна сама избавляться от массы вредного вещества, при этом не нарушая электрическую изоляцию». Далее будем искать решение, опираясь на формулировку ИКР-2.

По рекомендациям АРИЗ, для наглядного представления конфликта и максимально эффективного применения ВПР используем метод моделирования «маленькими человечками» (ММЧ) [11]. Суть ММЧ состоит в том, что физические противоречия представляются в виде схематичного рисунка, на котором действуют «маленькие человечки». Метод наглядно показывает то, что нужно сделать (идеальное действие), но не показывает физику действия. Изображать в виде «маленьких человечков» следует только изменяемые части модели (инструмент, Х-элемент). Схема конфликта по ММЧ изображена на рис. 3, а.

Схема конфликта понимается так же, как и при анализе рис. 2, однако преобразована под метод ММЧ. Человечки с руками вниз обозначают обычную пассивную поверхность провода, которая никак не препятствует оседанию снега. Человечек с руками вверх обозначает оттапливание или удаление налипшего снега. На рис. 3, а человек с руками вверх обозначает уже существующие в системе явления при налипании снега, такие как падение под собственным весом, сдувание изморози ветром и тому подобное. Однако, как показывает практика, таких явлений недостаточно, чтобы предотвратить гололёд, что отражено на рисунке. Преобразуем схему так, чтобы она не вызывала конфликта. Проще всего это сделать, увеличив количество человечков с поднятыми руками, как на рис. 3, б.

Из рис. 3, б понятно, какой должна быть готовая система. Необходимо увеличить воздействие отталкивающего усилия на вредное вещество – наледь. Задача сводится лишь к определению способа получения этой системы. Переформулируем задачу, используя метод «шаг назад от ИКР». Полученный результат изображен на рис, 3, в. Здесь стрелочки обозначают различное состояние человечков во времени, т.е. часть времени они не препятствуют накоплению вредного вещества, а часть времени они его активно отталкивают с поверхности провода.

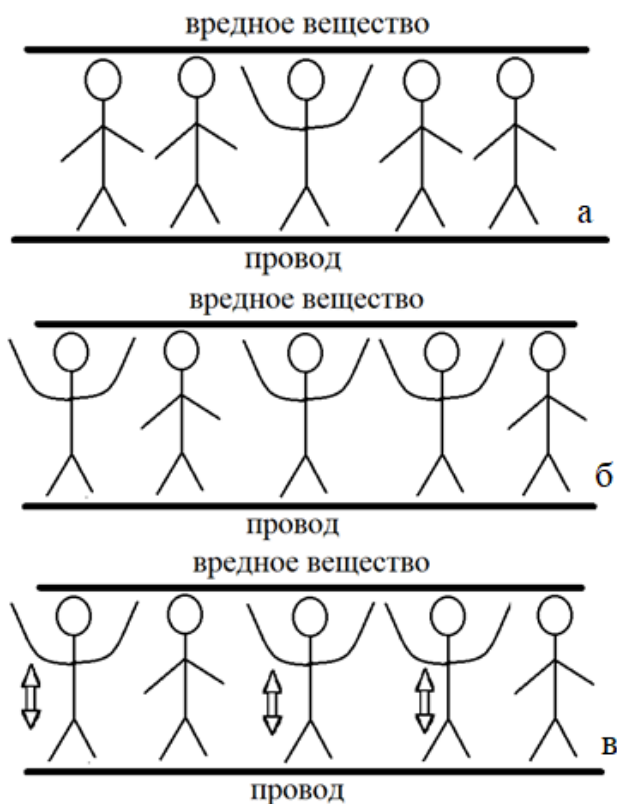


Рис. 3. ММЧ: а – схема конфликта, б – схема с устранённым конфликтом, в – устранение конфликта при шаге назад от ИКР

Таким образом, описание функции X-элемента определено. Осталось лишь найти технический способ его реализации, используя минимум имеющихся ресурсов. Для этого необходимо проанализировать способы решения, а именно в соответствии с рекомендациями АРИЗ [11] последовательно найдем ответы на следующие вопросы:

1. Решается ли задача применением смеси ресурсных веществ?

Нет, используя или видоизменяя имеющиеся вещества, определённые выше (провод, наледи), без введения вещества из внешних ресурсов невозможно добиться нужного результата.

Примечание. Как результат можно рассматривать плавку гололёда постоянным током (т.е. смесь теплового поля провода и наледи), но это уже известный метод и, исходя из практики, недостаточно эффективный и экономичный. Поэтому это решение игнорируем.

2. Решается ли задача заменой имеющихся ресурсных веществ пустотой или смесью ресурсных веществ с пустотой?

Нет, изменять изделие (провод) нельзя. Смешивание инструмента (снег/наледи) и вещества (провод) не представляется технически возможным.

3. Решается ли задача применением веществ, производных от ресурсных?

Нет, производные от имеющихся ВПР не дают эффекта без введения другого вещества извне.

4. Решается ли задача введением вместо вещества электрического поля?

Нет, введения дополнительного электрического поля или использование текущего само по себе не может уменьшить накопление вредного вещества. Напротив, электрическое поле только усиливает его накопление [7].

5. Решается ли задача применением пары «поле–добавка вещества», реагирующего на поле?

Да, это вполне допустимо. Можно поместить на поверхность провода вещество или поле, которое будет взаимодействовать с электромагнитным полем, выводя действие на макроуровень (т.е. вибрировать, отталкиваться, крутиться под воздействием электромагнитного поля). Можно взять взаимодействие наледи с тепловым полем провода. Но этот способ мы подвергли критике по причине его неэкономичности.

Проведенный анализ показывает, что без введения дополнительного устройства (X-элемента) улучшить старые или найти новые способы очистки гололёда не представляется возможным. На основании ИКР-2 понятно направление, в котором должны быть предложены решения, которые способствуют развитию данной технической системы (провод–отсутствие наледи). На основании проведенного анализа можно исключить существующие решения, которые противоречат развитию системы. Таким решением является использование робототехнических

устройств, которые перемещаются по проводам между пролетами, поскольку они используют внешние ресурсы и не используют внутренние ресурсы системы (рис. 4).



Рис. 4. Роботы Expliner и LineScout для очистки от наледи и мониторинга
[<http://elektroas.ru/sostoyanie-linij-elektroperedachi-proverit-expliner>]
[<https://robotrends.ru/robopedia/elektroenergetika-i-roboty>] (дата обращения: 25.10.2022)

3. Варианты технической реализации поставленной задачи. Определение X-элемента

Рассмотрим возможные варианты технической реализации решения поставленной задачи. Наиболее очевидным решением для X-элемента может быть наложение гидрофобной изоляции на поверхность провода. Такое решение уже нашло практическое применение. Таким образом, оно соответствует рекомендациям ТРИЗ и лежит в направлении развития этой технической системы. Гидрофобная изоляция применяется для некоторых видов вновь производимых проводов, но замена всех проводов на потенциально опасных по обледенению линиях связана с большими финансовыми затратами.

Следующим обсуждаемым вариантом для X-элемента является применение привода переменного тока на базе однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами. Эскизная модель привода представлена на рис. 5.

Привод работает следующим образом. По принципу работы электродвигатель представляет собой однофазный асинхронный двигатель с экранированными полюсами. Пульсирующий в проводнике линии электропередачи ток создает в магнитоприводе пульсирующий магнит-

ный поток. С помощью короткозамкнутых витков пульсирующий поток превращается в эллиптическое вращающееся поле. Оно имеет прямую составляющую и обратную составляющую. Обратная составляющая вращающегося поля будет ослаблена короткозамкнутыми витками и будет существенно меньше прямой составляющей. Под действием прямой составляющей ротор асинхронного двигателя придет во вращение. Конструкцию легко сделать разъемной для монтажа на пролетах ВЛЭП.

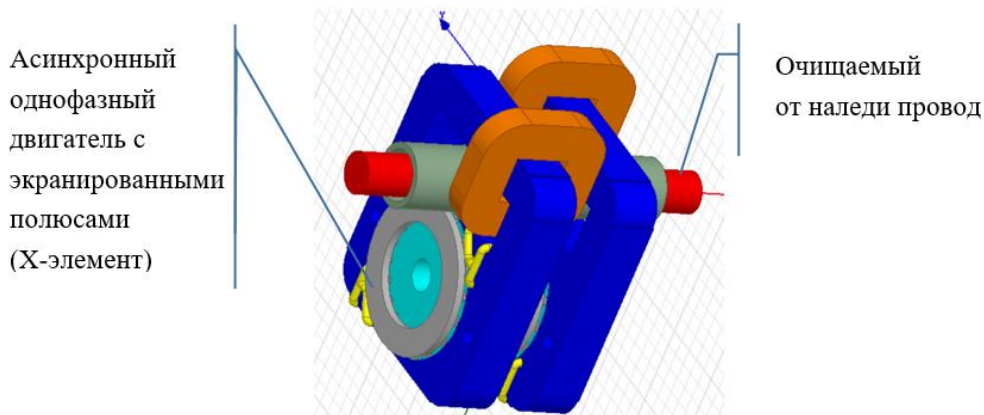


Рис. 5. Вариант привода переменного тока на базе однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами

Двигатель будет работать непрерывно, пока в линии есть ток. Для остановки двигателя необходимо катушку замкнуть накоротко. Она создаст встречный поток в магнитопроводе, и двигатель остановится. Принцип работы этой концепции проверен в лабораторных условиях. Развивая концепцию двигателя, можно существенно улучшить его. Для этого вместо конструкции с экранированными полюсами можно применить схему однофазного двигателя с расщепленными полюсами. Это даст возможность реверса данного АД. Описанные устройства должны иметь собственную систему управления. Она может работать в автоматическом режиме или быть включена в Единую систему контроля обледенения ВЛЭП.

Вполне реальным и эффективным способом решения проблемы может быть привод на основе создания вибрационных колебаний самого провода. В систему вводится Х-элемент, создающий механические колебания самого провода в период гололедообразования. При этом затрудняется отложение инея на провод, и существующий слой наледи

разрушается под действием этих колебаний. При этом питание привода можно брать из существующей сети, используя потенциал провода заземления. Создание импульсных или гармонических колебаний можно реализовать различными техническими устройствами, например, электромагнитами переменного тока. Одним из вариантов предлагаемого принципа могут быть распорки между проводами, в которые встроены вибраторный управляемый электромагнит (рис. 6).

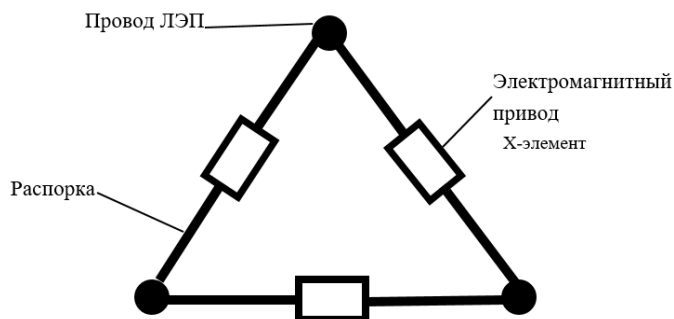


Рис. 6. Вариант расположения вибраторного электромагнита в распорках между проводами

Данный вариант вполне пригоден для ВЛЭП с относительно невысоким линейным напряжением. Распорки при этом могут служить ограничителями от перехлестывания проводов при ветровой нагрузке.

Наиболее простым и технологичным вариантом является расположение вибраторного электромагнита (X-элемента) между несущим изолятором и проводом (рис. 7).

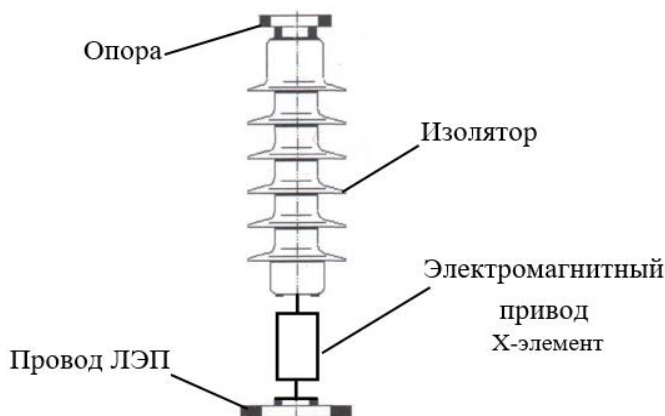


Рис. 7. Вариант расположения электромагнитного привода между проводом и изолятором

Питаться электромагнит может от разности потенциалов между проводом и заземлением. Система управления может быть встроена в электромагнит и срабатывать от датчиков влажности и температуры, которые определяют возникновение условий образования инея. Воздействия на провод могут быть импульсными или вибрационными. При выходе электромагнита из строя линия продолжает выполнять функцию передачи электроэнергии в полном объеме без изменения параметров сети.

4. Анализ вариантов решения задачи. Выбор базового варианта для промышленного внедрения

Проведем функционально-стоимостной анализ предложенных по ТРИЗ вариантов [14]. Все варианты могут решить поставленную задачу. Следует выбрать наиболее экономичный вариант.

Для производства провода с гидрофобной изоляцией необходимо провести дополнительные исследовательские работы по подбору материала с требуемыми характеристиками, соответствующего климатическим условиям. Изоляция провода ухудшит теплообмен с окружающей средой. Это приведет к повышению температуры провода, увеличению его активного сопротивления и дополнительным электрическим потерям, которые следует оценивать. Для серийного производства такого провода необходима модернизация производства с закупкой нового оборудования. Замена и утилизация существующего вполне работоспособного провода не всегда целесообразна, особенно на вновь введенных в эксплуатацию линиях. Таким образом, внедрение этого варианта потребует серьезных капитальных вложений. Его можно рекомендовать в качестве перспективного для вновь строящихся ВЛЭП.

Вариант оснащения пролетов механическим приводом на основе асинхронного двигателя с экранированными полюсами не потребует затрат на замену провода и модернизацию производства для его изготовления. При этом следует налаживать производство самого двигателя, который имеет нетиповую конструкцию. Для реализации концепции потребуется большое количество таких приводов (по три привода на каждый пролет). Конструкция самого привода потребует специального климатического исполнения, что окажет влияние на его стоимость. Следует отметить, что привод будет работать только при наличии достаточно больших токов в линии, который создает используемое двига-

телем магнитное поле. При малой токовой нагрузке в линии и ее отсутствии привод теряет работоспособность, а условия образования наледи могут при этом существовать. Перемещение привода вдоль пролета также затруднено. Для этой функции необходима разработка дополнительного привода, что усложнит конструкцию и сделает ее менее надежной. Ветровая нагрузка может также усложнять перемещение привода вдоль пролета. Режущий инструмент для снятия наледи потребует ремонта и замены. Регламентные работы по обслуживанию большого количества приводов потребуют больших капитальных затрат.

Варианты, реализующие вибрационный принцип, более надёжны и технологичны, так как не связаны с линейным перемещением вдоль пролета. Себестоимость производства электромагнита в разы меньше чем производство электродвигателя, так как он имеет более простую конструкцию и меньше комплектующих деталей. При этом вариант вибропривода в виде распорок между проводами в пролете потребует подбора специальных электроизоляционных материалов для исключения короткого замыкания при сложных погодных условиях. Для линий с высоким напряжением и расщепленным проводом данный вариант реализовать достаточно сложно. Монтаж распорок в середине пролета потребует специального оборудования и технологии. Непростыми будут регламент, ремонт и замена таких приводов.

Проведенный анализ делает наиболее привлекательным вибрационный привод на основе электромагнита втягивающего типа, расположенного между изолятором и проводом. Этот привод не потребует применения специальных изоляционных материалов, так как существующий изолятор на опоре будет выполнять эту функцию. Количества приводов этого типа потребуется в два раза меньше, так как их можно располагать через опору. Монтаж привода не затрагивает изменение конструкции существующих ВЛЭП и может вестись с опоры. При выходе электромагнита из строя линия продолжает выполнять функцию передачи электроэнергии в полном объеме без изменения параметров сети. Остаются вопросы относительно разработки такого привода и внедрения его в серийное производство, удастся ли приспособить конструкции существующих электромагнитов к требованиям по необходимым параметрам и климатическим условиям.

По мнению разработчиков, именно этот вариант следует рекомендовать к внедрению в эксплуатацию для ВЛЭП, подверженных наледи.

Разработка конкретного устройства, реализующего данный метод, уходит в область инженерного проектирования, что является следующим этапом исследований.

Заключение

Проблема борьбы с наледью на проводах воздушных линий электропередач остается актуальной и требует разработки надёжных и экономичных вариантов ее решения [15–26]. В проведенном исследовании приведена классификация основных существующих методов борьбы с наледью, дан их анализ, выявлены достоинства и недостатки. Для поиска оптимального решения был применён аппарат теории решения изобретательских задач. С помощью шагов алгоритма решения изобретательских задач было выявлено основное противоречие системы, определены внутренние и внешние вещественные и энергетические ресурсы системы, сделан анализ на макро и микроуровнях. Анализ показал, что разрешить внутреннее противоречие системы, т.е. устранить наледь должен дополнительный X-элемент, который необходимо в систему ввести. В качестве такого элемента были рассмотрены варианты гидрофобной изоляции, механического очистителя на основе асинхронного электродвигателя с экранированными полюсами, вариант электромагнита, создающего вибрационное воздействие на провод. К реальному внедрению в практику эксплуатации ВЛЭП рекомендован вариант вибрационного электромагнита, расположенного между опорой и изолятором. Дальнейшую перспективу исследований представляют инженерные работы по созданию конкретной конструкции и внедрению ее в серийное производство.

Библиографический список

1. Ратушняк В.С., Ильин Е.С., Вахрушева О.Ю. Статистический анализ аварийных отключений электроэнергии из-за гололедообразования на проводах ЛЭП на территории РФ // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журнал. – 2018. – № 1. – URL: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018>
2. Способ плавки гололеда на проводах трехфазной воздушной линии электропередачи / Р.Н. Бердников [и др.]. – М., 2012.
3. Современные методы борьбы с гололёдными отложениями на проводах воздушных линий электропередачи средствами силовой элек-

троники / А.А. Кувшинов, В.Ф. Карманов, Н.Г. Ахметжанов, П.С. Радин, Н.М. Александров, А.Ю. Хренников // Энергетик. – 2018. – № 7. – С. 27–33.

4. Белый Д.М. Устройство для удаления гололедных отложений с проводов. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2014.

5. Бернгардт Р.П. Линия электропередачи с маятниковой защитой от обледенения бернгардта. – 1997.

6. Меркурьев П.А., Долгопол Т.Л. Использование композитных проводов для ВЛ // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы V Всерос. науч.-практ. конф.; 16–17 декабря 2020 / под ред. Р.В. Беляевский, И.А. Лобур. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2021.

7. Белый Д.М. Воздушная линия электропередачи. – 2014.

8. Кучер В.И. Провод для линии электропередачи, устойчивой к вибрациям и обледенению. – 2009.

9. Альтшуллер Г.С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. – Петрозаводск: Скандинавия, 2003.

10. Альтшуллер Г.С. АРИЗ – значит победа, в сб.: Правила игры без правил / сост. А.Б. Селюцкий. – Петрозаводск: Карелия, 1989; Альтшуллер Г.С., Селюцкий А.Б. Крылья для Икара: как решать изобретательские задачи. – Петрозаводск: Карелия, 1980.

11. Альтшуллер Г.С., Алгоритм изобретения. – М.: Московский рабочий, 1973.

12. Альтшуллер Г.С., Злотин Б.Л., Филатов В.И. Профессия – поиск нового. – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1985.

13. Введение в ТРИЗ. Основные понятия и подходы (офиц. издание фонда Г.С. Альтшуллера) [Электронный ресурс]. – URL: <https://altshuller.ru/> (дата обращения: 15.10.2022).

14. Герасимов В.М., Литвин С.С. Учет закономерностей развития техники при проведении функционально-стоймостного анализа технологических процессов // Практика проведения функционально-стоймостного анализа в электротехнической промышленности. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 193–210.

15. Ахмедова О.О., Сошинов А.Г., Панасенко М.В. Анализ воздействия электромагнитного поля на образование гололедных отложений на воздушных линиях электропередачи // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 9–2. – С. 210–214.

16. Бунзя А.В. Разработка устройства удаления гололеда с двойного контактного провода импульсно-резонансным методом на основе управляемого преобразователя: дис. канд. техн. наук / Урал. гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2007. – 185 с.

17. Данилов Г.А., Саушкин В.В. Устройство для удаления обледенения с проводов линий электропередач (варианты) – описание полезной модели к патенту RU 128 796 U1. – 2013. – 25 с.

18. Банников Ю.И., Николаев Н.Я. Исследование процесса гололедно-изморозевого образования в электрическом поле с разработкой системы противогололедных мер: отчет 78071239, инв. N Б 819048. ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1979. – С. 230.

19. Expliner – робот для обслуживания линий электропередач выходит на работу [Электронный ресурс] // Новости технологий. – URL: <http://techvesti.ru/node/3807> (дата обращения: 15.10.2022).

20. Борьба с гололедом – Эксплуатация воздушных линий электропередачи [Электронный ресурс] // Энергетика: оборудование, документация. – URL: http://forca.ru/instrukcii-po-ekspluatacii/vl/ekspluataciya-vozdushnyh-linii-eksploatacii_4.html (дата обращения: 13.10.2022).

21. Автоматическая система удаления льда с проводов линий электропередач / В.А. Соловьев [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: Изд-во Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-та, 2012. – URL: <http://www.sworld.com.ua/simpoz2/72.pdf>. – 2012 (дата обращения: 15.10.2022).

22. Алмаев М.А., Трофимов А.В. Электромеханическое вибрационное устройство очистки линий электропередачи от гололедных отложений // Сб. науч.-исслед. работ аспирантов – финалистов конкурса аспирантов и молодых ученых в обл. энергосбереж. в пром-ти; г. Новочеркасск, октябрь 2010 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. (НПИ). – Новочеркасск: Лик, 2010. – С. 3–5.

23. Дьяков Ф.А. Опыт эксплуатации ЛЭП 330–500 кВ в условиях интенсивных гололедно-ветровых воздействий. Распределенная система автоматического наблюдения за гололедом // Информационно-аналитический журнал ЭнергоINFO. – М., 2010. – С. 45–55. – URL: www.energo-info.ru/images/pdf/mes4/15.pdf (дата обращения: 25.10.2022).

24. Аппаратура каналов связи и телемеханики по ЛЭП с цифровым уплотнением каналов АКСТ «ЛИНИЯ-Ц» со встроенным блоком РЗ и ПА [Электронный ресурс] // ОАО «Шадринский телефонный завод». – URL: http://shtz.shadrinsk.net/pr_akstc.htm (дата обращения: 15.10.2022).

25. Пат. 2442256 С1 Рос. Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Способ удаления обледенения с проводов линий электропередач / В.М. Козин, В.А. Соловьев, Д.А. Орлов, С.И. Сухоруков, К.С. Малых; заяв. и патентооблад. ФГОУ ВПО «Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет» – № 2010144485/07; заявл. 29.10.2010; опубл. 10.02.2012. Бюл. № 4. – 4 с.

26. Пат. 2449443 С1 Рос. Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления льда с провода линии электропередач / В.М. Козин, В.А. Соловьев, Д.А. Орлов, С.И. Сухоруков; заявит. и патентооблад. ФГОУ ВПО «Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет», ГОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» – № 2011106260/07; заявл. 17.02.2011; опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12. – 7 с.

References

1. Ratushniak V.S., П'ин E.S., Vakhrusheva O.Iu. Statisticheskii analiz avariinykh otkliuchenii elektroenergii iz-za gololedobrazovaniia na provodakh LEP na territorii Rossiiskoi Federatsii [Statistical analysis of emergency power outages due to ice formation on power line wires in the territory of the Russian Federation]. *Molodaia nauka Sibiri: elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2018, no. 1, available at: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2018>

2. Berdnikov R.N. et al. Sposob plavki gololeda na provodakh trekhfaznoi vozdushnoi linii elektroperedachi [A method of melting ice on the wires of a three-phase overhead power line]. Moscow, 2012.

3. Kuvshinov A.A., Karmanov V.F., Akhmetzhanov N.G., Radin P.S., Aleksandrov N.M., Khrennikov A.Iu. Sovremennye metody bor'by s gololednymi otlozheniiami na provodakh vozdushnykh linii elektroperedachi sredstvami silovoi elektroniki [Modern methods of combating icy deposits on overhead power transmission lines by means of power electronics]. *Energetik*, 2018, no. 7, pp. 27-33.

4. Belyi D.M. Ustroistvo dlia udaleniia gololednykh otlozhenii s provodov [Device for removing icy deposits from wires]. Ul'ianovsk: Ul'ianovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2014.

5. Berngardt R.P. Liniia elektroperedachi s maiatnikovoi zashchitой ot obledeneniia berngardta [Power transmission line with pendulum protection from icing Bernhardt]. 1997.

6. Merkur'ev P.A., Dolgopol T.L. Ispol'zovanie kompozitnykh provodov dlia VL [The use of composite wires for overhead lines]. *Energetika i energosberezhenie: teoriia i praktika. Materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 16-17 December 2020*. Ed. R.V. Beliaevskii, I.A. Lobur. Kemerovo: Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2021.

7. Belyi D.M. Vozdushnaia liniia elektroperedachi [Overhead power line]. 2014.

8. Kucher V.I. Provod dlia linii elektroperedachi, ustoichivoi k vibratsiiam i obledeneniuiu [Wire for a power transmission line resistant to vibrations and icing]. 2009.

9. Al'tshuller G.S. Naiti ideiu. Vvedenie v teoriuu resheniia izobretatel'skikh zadach [Find an idea. Introduction to the theory of inventive Problem Solving]. Petrozavodsk: Skandinauiia, 2003.

10. Al'tshuller G.S., ARIZ - znachit pobeda, v sbornike: Pravila igry bez pravil [ARIZ means victory, in Sat.: Rules of the game without rules]. Petrozavodsk, 1989, Al'tshuller G.S., Seliutskii A.B. Kryl'ia dlia Ikara: kak reshat' izobretatel'skie zadachi [Wings for Icarus: How to solve inventive problems]. Petrozavodsk: Kareliia, 1980.

11. Al'tshuller G.S., Algoritm izobreteniiia [Algorithm of invention]. Moscow: Moskovskii rabochii, 1973.

12. Al'tshuller G.S., Zlotin B.L., Filatov V.I. Professiiia - poisk novogo [Profession-search for a new]. Kishinev: Kartia Moldoveniaske, 1985.

13. Vvedenie v TRIZ. Osnovnye poniatiiia i podkhody (ofitsial'noe izdanie fonda G.S. Al'tshullera) [E-book "Introduction to TRIZ. Basic Concepts and approaches" (official publication of the G.S. Altshuller Foundation)], available at: <https://altshuller.ru/> (accessed 15 October 2022).

14. Gerasimov V.M., Litvin S.S. Uchet zakonornostei razvitiia tekhniki pri provedenii funktsional'no-stoimostnogo analiza tekhnologicheskikh protsessov [Taking into account the regularities of the development of technology during the functional-bridge analysis of technological processes]. *Praktika provedeniia funktsional'no-stoimostnogo analiza v elektrotekhnicheskoi promyshlennosti*. Moscow: Energoatomizdat, 1987, pp. 193-210.

15. Akhmedova O.O., Soshinov A.G., Panasenko M.V. Analiz vozdeistviia elektromagnitnogo polia na obrazovanie goloednykh otlozhenii na vozdushnykh liniiaakh elektroperedachi [Analysis of the electromagnetic

field effect on the formation of icy deposits on overhead power transmission lines] *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniï*, 2015, no. 9-2, pp. 210-214.

16. Bunzia A.V. Razrabotka ustroïstva udaleniia gololeda s dvoïnogo kontaktnogo provoda impul'sno-rezonansnym metodom na osnove upravliaemogo preobrazovatelïa [Development of a device for removing ice from a double contact wire by a pulse-resonance method based on a controlled converter]. Ph. D. thesis. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniia, 2007, 185 p.

17. Danilov G.A., Saushkin V.V. Ustroïstvo dlia udaleniia obledeneniia s provodov linii elektroperedach (varianty) - opisaniie poleznoi modeli k patentu RU 128 796 U1 [Device for removing icing from wires of power lines (variants) - description of the utility model to the patent EN 128,796 U1]. 2013, 25 p.

18. Bannikov Iu.I., Nikolaev N.Ia. Issledovaniie protsessã gololednoizmorozevogo obrazovaniia v elektricheskom pole s razrabotkoi sistemy protivogollednykh mer: otchet 78071239, inv. N B 819048. CHIMESKh [Investigation of the process of ice-frost formation in an electric field with the development of a system of anti-ice measures. Report 78071239, inv. N B 819048. CHIMESH]. Cheliabinsk, 1979, 230 p.

19. Expliner - robot dlia obsluzhivaniia linii elektroperedach vykhodit na rabotu [Expliner - a robot for servicing power lines goes to work]. *Novosti tekhnologii*, available at: <http://techvesti.ru/node/3807> (accessed 15 October 2022).

20. Bor'ba s gololedom - Ekspluatatsiia vozdushnykh linii elektroperedachi [Fight against ice - Operation of overhead power lines]. *Energetika: oborudovaniie, dokumentatsiia*, available at: http://forca.ru/instrukcii-po-ekspluatatsii/vl/ekspluatatsiya-vozdushnyh-liniielektroperedachi_4.html (accessed 13 October 2022).

21. Solov'ev V.A. et al. Avtomaticheskãia sistema udaleniia l'dã s provodov linii elektroperedach [Automatic ice removal system from power line wires]. Komsomol'skii-na-Amure: Komsomol'skii-na-Amure gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2012, available at: <http://www.sworld.com.ua/simpoz2/72.pdf> (accessed 15 October 2022).

22. Almaev M.A., Trofimov A.V. Elektromekhanicheskoe vibratsionnoe ustroïstvo ochistki linii elektroperedachi ot gololednykh otlozhenii [Electromechanical vibrating device for cleaning power transmission lines

from icy deposits]. *Sbornik nauchno-issledovatel'skikh rabot aspirantov - finalistov konkursa aspirantov i molodykh uchenykh v oblasti energoberezheniia v promyshlennosti, Novochoerkassk, October 2010. Iuzhno-Rossiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet (Novochoerkasskii politekhnicheskii institut)*. Novochoerkassk: Lik, 2010, pp. 3-5.

23. D'iakov F.A. Opyt ekspluatatsii LEP 330-500 kV v usloviakh intensivnykh gololedno-vetrovykh vozdeistvii. Raspredelennaia sistema avtomaticheskogo nabliudeniia za gololedom [Experience of operation of 330-500 kV transmission lines in conditions of intense icy-wind impacts. Distributed system of automatic monitoring of ice]. *Informatsionno-analiticheskii zhurnal EnergoINFO*. Moscow, 2010, pp. 45-55, available at: www.energo-info.ru/images/pdf/mes4/15.pdf (accessed 25 October 2022).

24. Apparatura kanalov sviazi i telemekhaniki po LEP s tsifrovym uplotneniem kanalov AKST "LINIYa-Ts" so vstroennym blokom RZ i PA [Equipment of communication channels and telemechanics via power lines with digital sealing of AKST "LINIYA-Ts" channels with a built-in RZ and PA unit]. OAO "Shadrinskii telefonnyi zavod", available at: http://shtz.shadrinsk.net/pr_akstc.htm (accessed 15 October 2022).

25. Kozin V.M., Solov'ev V.A., Orlov D.A., Sukhorukov S.I., Malykh K.S. Sposob udaleniia obledeneniia s provodov linii elektroperedach [Method removal of icing from the wires of power lines]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2442256 C1 (2012).

26. Kozin V.M., Solov'ev V.A., Orlov D.A., Sukhorukov S.I. Ustroistvo dlia udaleniia l'da s provoda linii elektroperedach [Device for removing ice from a power line wire]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2449443 C1 (2012).

Сведения об авторах

Ульман Ярослав Сергеевич (Челябинск, Россия) – магистр кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, Проспект Ленина, 76, e-mail: n.ulma2010@yandex.ru).

Ганджа Сергей Анатольевич (Челябинск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, Проспект Ленина, 76, e-mail: gandzhasa@susu.ru).

Коробатов Денис Владимирович (Челябинск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции и системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, Проспект Ленина, 76, e-mail: korobatovdv@susu.ru).

Лекерова Екатерина Маратовна (Челябинск, Россия) – магистр кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, Проспект Ленина, 76, e-mail: lekerovaekaterina99@mail.ru).

Козлов Максим Сергеевич (Челябинск, Россия) – магистр кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, Проспект Ленина, 76, e-mail: kozlovms98@mail.ru).

About the authors

Iaroslav S. Ulman (Cheljabinsk, Russian Federation) – Master of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics of the South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Prospekt Lenina, 76, e-mail: n.ulma2010@yandex.ru).

Sergey A. Gandzha (Cheljabinsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics of the South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Prospekt Lenina, 76, e-mail: gandzhasa@susu.ru).

Denis V. Korbatov (Cheljabinsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Stations and Power Supply Systems of the South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Prospekt Lenina, 76, e-mail: korobatovdv@susu.ru).

Ekaterina M. Lekerova (Cheljabinsk, Russian Federation) – Master of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics of the South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Prospekt Lenina, 76, e-mail: lekerovaekaterina99@mail.ru).

Maxim S. Kozlov (Cheljabinsk, Russian Federation) – Master of the Department of electric drive, mechatronics and electromechanics of the South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Prospekt Lenina, 76, e-mail: kozlovms98@mail.ru).

Поступила: 10.10.2022. Одобрена: 21.10.2022. Принята к публикации: 22.12.2022.

Финансирование. Исследование финансировалось из фонда ректора Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего обра-

зования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Применение теории решения изобретательских задач для разработки способа очистки линий электропередач от наледи / Я.С. Ульман, С.А. Ганджа, Д.В. Коробатов, Е.М. Лекерова, М.С. Козлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 157–181. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.09

Please cite this article in English as:

Ulman I.S., Gandzha S.A., Korobатов D.V., Lekerova E.M., Kozlov M.S. Application of the theory of solving inventive problems for the development of a method for cleaning power lines from ics. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 43, pp. 157-181. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.09