На правах рукописи

ВЛАСЕНКО Сергей Анатольевич

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ БОЛТОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Хабаровск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС).

Научный руководитель:

Игнатенко Иван Владимирович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС), кафедра «Системы электроснабжения», заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Сидоров Олег Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель Российской Федерации, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ОмГУПС), кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», заведующий кафедрой;

Сухоруков Сергей Иванович, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на Амуре государственный университет», кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», доцент.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения».

Защита состоится «___» _____ 2020 г. в __ час. 00 мин. на заседании объединённого диссертационного совета Д 999.086.03 при ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет» по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, корпус 3, аудитория 201/3. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «КнАГУ» и на официальном сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/132.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «КнАГУ», учёному секретарю диссертационного совета Д 999.086.03, e–mail: epapu@knastu.ru.

Автореферат разослан «___» _____2020 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
Д 999.086.03, к.т.н., доцент А.С. Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В последние 10-15 лет устойчивая работа элементов системы тягового электроснабжения является одной из важных задач в обеспечении роста грузооборота железнодорожного транспорта, который к 2030 г. по прогнозам увечится почти в 1,7 раза. А это, в свою очередь, обусловлено значительным увеличением массы поездов: 6000, 7100, 9000, 12000 тонн, что в значительной степени может снизить надежность работы системы тягового электроснабжения из-за токов повышенной величины.

Поставленные цели по повышению пропускной способности могут быть достигнуты только при условии внедрения инновационных технологий на железнодорожном транспорте. Одним из важных направлений реализации стратегии ОАО «РЖД» будет совершенствование системы тягового электроснабжения благодаря переоснащению основных фондов и внедрению новых диагностических комплексов, что, безусловно, повысит эффективность работы и надежность инфраструктуры.

Общеизвестно, что контактная сеть (КС) является уязвимым объектом, который фактически не имеет резерва. Из этого следует, что стоит задача повышения надежности отдельных элементов контактной подвески при ее эксплуатации.

В условиях увеличения интенсивности движения поездов, сокращения интервалов попутного следования в хозяйстве электроснабжения проводится планомерная и целенаправленная работа по снижению количества отказов технических средств.

Несмотря на проводимую работу по текущей эксплуатации, капитальному ремонту и инвестициям, на сегодняшний день не удается существенно снизить деградационные отказы технических средств, т.е. отказы, обусловленные естественными процессами старения, износа, коррозии и усталости оборудования.

Большая часть электрических соединений на контактной сети выполняется болтово-плашечными зажимами. Повреждение соединительной арматуры занимает второе место по частоте отказов после контактного провода. Важной проблемой обрыва проводов является перегрев мест соединений, осуществляемых с помощью токопроводящих питающих зажимов. Следовательно, первоочередной и наиболее важной задачей является повышение не только надёжности электрических соединений, но и работоспособности системы тягового электроснабжения (СТЭ), которую можно решить совершенствованием мониторинга и диагностики на основе новых методик контроля текущего состояния элементов тяговой сети.

Степень разработанности темы исследования

Диссертационное исследование выполнено на основе работ отечественных и зарубежных ученых, которые посвящены исследованиям тепловых процессов в системе тягового электроснабжения (Бочев А.С., Воронин А.В., Галкин А.Г., Гаранин М.А., Григорьев В.Л., Гуков А.И., Гуменюк В.И., Жарков Ю.И.,

Костюченко К.Л., Купцов Ю.Е., Ли В.Н., Игнатьев В.В., Марквардт Г.Г., Марквардт К.Г., Петрова Т.Е., Порцелан А.А., Сердинов С.М., Сидоров О.А., Смердин А.Н., Титков В.В., Фигурнов Е.П., Паранин А.В. и многие другие ученые).

Объектом исследования является контактная сеть системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ.

Предметом исследования являются электротепловые процессы контактной сети переменного тока 25 кВ, методы и алгоритмы оценки состояния болтовых контактных соединений.

Цель исследования – повышение работоспособности системы тягового электроснабжения путем совершенствования метода определения состояния болтовых электрических соединений на основе критериального подхода в оценке величины переходного сопротивления.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Определить факторы, влияющие на работоспособность системы тягового электроснабжения и существующие методы оценки состояния болтовых электрических соединений в условиях эксплуатации.

2. Разработать математическую модель определения температуры электрических соединений при действии токов различной величины.

3. Разработать математическую модель определения коэффициента дефектности для нестационарных режимов работы контактной сети.

4. Определить критерии оценки значения переходного сопротивления текущего состояния болтовых электрических соединений.

5. Усовершенствовать систему мониторинга и контроля состояния электрических соединений для повышения работоспособности системы тягового электроснабжения.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложена формула определения превышения температуры болтового электрического соединения от начального превышения температуры при его охлаждении, которая позволяет произвести расчеты величины температуры за исследуемый промежуток времени.

2. Впервые получена математическая модель, описывающая изменение коэффициента дефектности в зависимости от интервалов времени для цикла «нагрев-охлаждение», что позволяет исследовать нестационарные режимы изменения коэффициента дефектности во время пропуска тока разной величины по электрическому соединению.

3. Установлены дополнительные критерии, имеющие прямую корреляционную зависимость с величиной переходного сопротивления, что позволяет дать оценку текущего состояния болтового электрического соединения.

4. Предложена система мониторинга и диагностики состояния болтовых электрических соединений в процессе эксплуатации, позволяющая за счет

критериального подхода повысить работоспособность системы тягового электроснабжения.

Теоретическая и практическая ценность

1. Установлен механизм, приводящий к отказу электрического соединения в эксплуатации, выявлена причина нарушения работоспособности системы тягового электроснабжения, которая возникает из-за неисправностей болтовых соединений; определены причины недостоверной оценки состояния электрических соединений в условиях эксплуатации из-за несовершенства существующих методов диагностики.

2. Разработана математическая модель, которая показывает изменение коэффициента дефектности в зависимости от интервалов времени для цикла «нагрев-охлаждение», в целях исследования нестационарных режимов изменения коэффициента дефектности во время пропуска тока разной величины по электрическому соединению. В среде Mathcad разработана программа расчета коэффициента дефектности для нескольких циклов «нагрев-охлаждение», имитирующих реальную эксплуатационную нагрузку резко переменного характера.

3. Предложена и внедрена методика для проведения диагностического исследования, позволяющая оценивать текущее состояние электрического соединения в процессе его эксплуатации.

Личный вклад автора состоит: в проведении анализа функционирования токопроводящих зажимов контактной сети с последующим формированием задач теоретических и экспериментальных исследований; в разработке математической модели тепловых процессов, протекающих в болтовых соединениях; в систематизации и анализе результатов исследования; в установлении основных критериев по оценке состояния электрического соединения; в разработке методики для определения состояния электрического соединения.

Методы исследования. Поставленная в диссертации цель достигается комплексными аналитическими и экспериментальными исследованиями.

Моделирование тепловых процессов в соединительных узлах подвески произведено с использованием программного обеспечения SolidWorks методом конечных элементов. Численные расчеты выполнены в программной среде Mathcad.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложена формула определения превышения температуры болтового электрического соединения от начального превышения температуры при его охлаждении, которая позволяет произвести расчеты величины температуры за исследуемый промежуток времени.

2. Разработанная математическая модель, позволяющая описывать нестационарные режимы изменения коэффициента дефектности во время пропуска тока разной величины.

3. Установлены дополнительные критерии, имеющие прямую корреляционную зависимость с величиной переходного сопротивления, что позволяет дать оценку текущего состояния болтового электрического соединения.

4. Методика проведения диагностического исследования, позволяющая оценивать текущее состояние электрического соединения в процессе его эксплуатации.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных положений и выводов обоснована теоретически и подтверждена экспериментальными исследованиями. Измерения проводились поверенной аппаратурой и приборами контроля с учетом погрешностей всех видов измерений. Расхождение между данными, полученными практическими исследованиями и результатами расчетов, не превышает 5 %.

Основные результаты исследований докладывались, обсуждались и были одобрены на:

- всероссийской научно-практической конференции «Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы», г. Хабаровск, ДВГУПС, 2015 г;
- всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке», г. Хабаровск, ДВГУПС, 2015 г;
- всероссийской межвузовской студенческой научной конференции «Научно-техническому и социально-экономическому развитию Дальнего Востока России – инновации молодых», г. Хабаровск, ДВГУПС, 2016, 2017 г;
- XIX конкурсе молодых ученых и аспирантов Хабаровского края, г. Хабаровск, 2017 г;
- всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке», г. Хабаровск, ДВГУПС, 2017, 2018 г.;
- всероссийской научно-технической конференции «Влияние надежности устройств электроснабжения на работу транспорта», г. Екатеринбург, УрГУПС, 2019 г;
- международном симпозиуме «ELTRANS 10.0», г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2019 г;
- международной научной конференции «Инновационные технологии развития транспортной отрасли», г. Хабаровск, ДВГУПС, 2019;
- заседаниях и научно-технических семинарах кафедры «Системы электроснабжения», г. Хабаровск, ДВГУПС, 2015 – 2019 годы.

Научные достижения. Новизна и значимость полученных результатов настоящего исследования удостоена диплома (I место в секции «Технические и химические науки» XIX краевого конкурса молодых ученых и аспирантов 2017 г.) за научный доклад на тему «Определение переходного сопротивления

электрических соединений системы тягового электроснабжения в процессе эксплуатации».

Результаты работы внедрены на Дальневосточной дирекции по энергообеспечению Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД», в научно-исследовательскую работу и учебный процесс ДВГУПС.

Публикации. Основные выводы и предложения по рассматриваемым в диссертации вопросам нашли отражение в 17 печатных работах, в том числе в четырех статьях, две из которых опубликованы в журналах перечня ВАК Российской Федерации, две – в журналах, входящих в международную систему цитирования Scopus, а также в двух патентах на изобретения.

Структура и объем диссертации. Работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 107 наименований, три приложения. Текст диссертационной работы изложен на 135 страницах печатного текста, включает 14 таблиц, 39 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, значимость выбранной темы диссертации, ее научное и практическое значение, сформулированы цель и задачи исследований и основные научные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлен анализ работы, рассматриваются причины отказов электрических соединений контактной сети, определены перспективные направления повышения их надежности.

На основании анализа установлено, что среди наиболее слабых мест контактной подвески являются места соединения проводов контактной подвески. Выявлены причины отказов электрических соединений. Установлена зависимость перерывов электроснабжения вследствие возникновения разного рода неисправностей болтовых соединений. Установлено влияние конструктивно-технологических факторов на надежность работы электрического соединения, важным элементом в структуре которого является контактное переходное сопротивление. Составлена блок-схема алгоритма выявления причин отказа электрического соединения и построены кривые, отражающие изменение сопротивления контакта во времени (рис 1).

При реализации тяжеловесного движения в бо̀льшей степени снижается надежность работы СТЭ из-за токов повышенной величины. В контактной подвеске, осуществляющей передачу электрической энергии от тяговых подстанций к электроподвижному составу, важными элементами являются токопроводящие зажимы – места электрического соединения проводов. Наряду с этим болтовое электрическое соединение является основным способом соединения проводов контактной подвески.

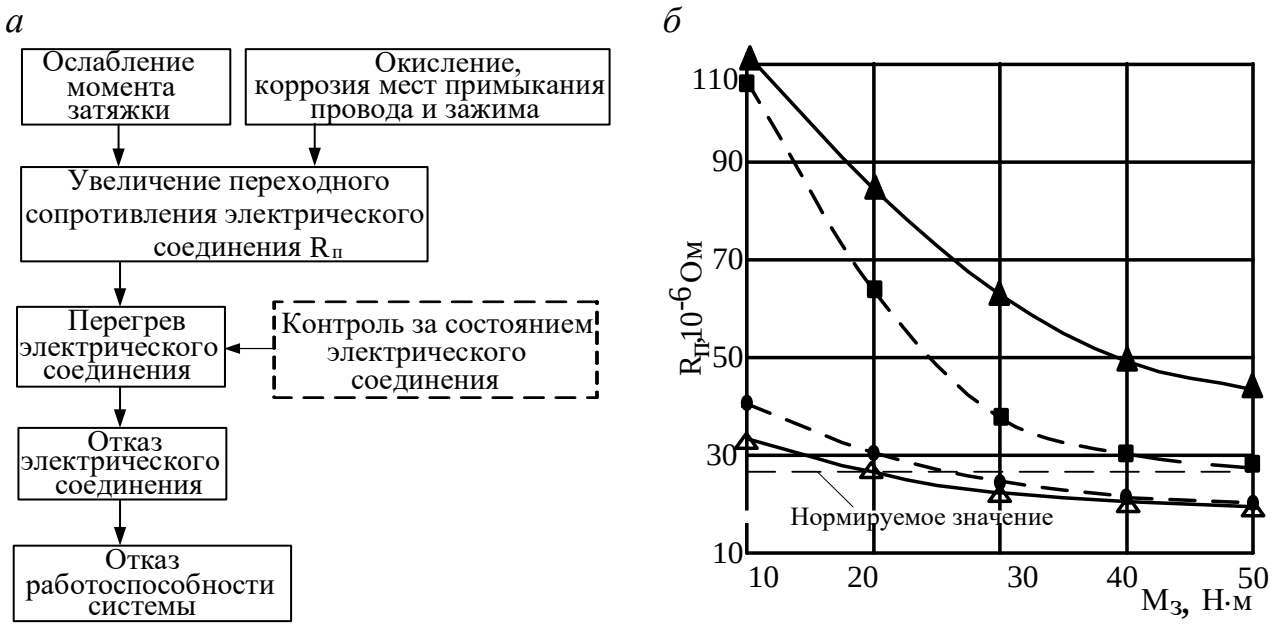

Рис. 1. Блок-схема причин отказа работоспособности системы электроснабжения из-за неудовлетворительного состояния электрического соединения (*а*) и кривые, отражающие зависимость переходного сопротивления от момента затяжки болтового соединения (*б*):
△ – новый зажим (зачищенный); ● – окисленный зажим в состоянии поставки;
▲ – зажим после двух лет эксплуатации; ■ – зажим после года эксплуатации.

На основании статистики отказов в работе контактной сети установлено, что 12 % всех отказов приходится на зажимы и детали. Число повреждений контактного провода не уменьшается с течением времени и составляет 37 %, около 20 % из которых связано с нагревом мест соединения контактной подвески. Определяющим фактором, влияющим на нагрев электрического соединения, является его переходное сопротивление $R_п$, которое напрямую зависит от момента затяжки и возникновения окисных пленок в местах примыкания провода и зажима.

Превышение величины нормируемого значения переходного сопротивления $R_п$ приводит к перегреву электрического соединения и, как следствие, к его отказу (рис. 1, *а*).

Следовательно, удовлетворительное состояние электрического соединения (СЭС) заключается в том, что за время протекания электрического тока величина нагрева соединения не будет превышать установившейся величины нагрева проводов, входящих в это соединение.

Повышение надежности электрических соединений является важной задачей при повышении работоспособности СТЭ, которую можно решить благодаря совершенствованию диагностических комплексов, базирующихся на новых методиках контроля и мониторинга.

Объектом исследования в диссертации является болтовое электрическое соединение, являющееся базовым элементом соединения проводов контактной подвески. Конструктивно зажим изготовлен из двух бронзовых плашек, соединенных стальными болтами. Каждая матрица создана с двумя углублениями для размещения в желобе, образованном контактными проводами и

соединительными кабелями.

На рис. 1, *б* приведены результаты лабораторных исследований болтовых электрических соединений, выполненных при различных условиях эксплуатации контактной поверхности зажимов. Величина переходного сопротивления электрического соединения в зависимости от момента затяжки меняется от 14 до 110 мкОм, при нормируемом значении 25 мкОм.

Из этого следует, что определение переходного сопротивления $R_п$ в эксплуатации является актуальной задачей. Определение этой величины должно осуществляться косвенными способами, так как прямое измерение сопротивления (при помощи измерительных мостов) в эксплуатации невозможно. Косвенное определение величины переходного сопротивления возможно лишь при условии изучения тепловых процессов, происходящих в электрическом соединении.

Также рассмотрены существующие методы диагностирования электрических соединений, которые в настоящее время не могут дать достоверной оценки СЭС в процессе эксплуатации.

В главе 2 представлено моделирование процессов нагрева и охлаждения болтового электрического соединения и проведено математическое моделирование коэффициента дефектности в зависимости от времени протекания тока.

Автором предложено провести исследование тепловых процессов в фазах нагрева и охлаждения системы «провод – электрическое соединение» с тем, чтобы определить косвенные критерии оценки величины переходного сопротивления Rп.

Фаза нагрева описывается известным выражением баланса тепловых процессов в электрическом соединении:

$$(C_з m_з + C_{пр} m_{пр})\frac{d\theta}{dt} = I^2 R_{K20}\left[1 + \alpha'(T_{окр} + \theta(t) + 20)\right] - \\ - \left[0.1312\theta^{1.4929} + \varepsilon S \cdot 5.6697 \cdot 10^{-8}\left[(T_{зам} + 273)^4 - (T_{окр} + 273)^4\right]\right], \quad (1)$$

где $C_з$ – удельная теплоемкость материала зажима, , Вт·с/(кг·К); $m_з$ – масса зажима, кг; $T_{ОКР}$ – температура воздуха, ^{0}С; $C_{пр}$ – удельная теплоёмкость материала провода, Вт·с/(кг·К); $m_{пр}$ – погонная масса провода, м; $\theta(t) = T_{пр} - T_{окр}$ – превышение температуры провода над температурой окружающей среды, °С; I – тяговый ток, А; R_{K20} – суммарное переходное сопротивление контактных поверхностей при температуре 20 °С, Ом·мм^2/м; α′ – температурный коэффициент изменения сопротивления, 1/°С; S – площадь поперечного сечения провода, мм^2; $T_{окр}$ – температура воздуха, °С; $T_{зам}$ – температура зажима, °С; ε – относительный коэффициент черноты материала плашки.

Уравнение процесса охлаждения является частным случаем уравнения (1), в котором ток нагрева принимается равным нулю, исключая теплопоступление, выделяемое на переходном сопротивлении. В таком случае уравнение примет вид:

$$(C_з m_з + C_{пр} m_{пр}) \cdot \frac{d\theta_c}{dt} = -[0{,}01312 \cdot \theta^{1{,}4929} + \\ + \varepsilon S \cdot 5{,}6697 \cdot 10^{-8}[(T_{заж} + 273)^4 - (T_{окр} + 273)^4]]. \quad (2)$$

После преобразований уравнения (2) получим конечную формулу для расчета превышения температуры зажима θ при его охлаждении от начального превышения θ_0 в виде:

$$\theta(t) = \left(\frac{0{,}0108438 \cdot t}{C_з m_з + C_{пр} m_{пр}} + \frac{1}{\theta_0^{0{,}4929}} \right)^{-2{,}029}. \quad (3)$$

В целях получения дополнительной информации предлагается перейти от абсолютных величин измерения температуры к относительным величинам, которые определяются коэффициентом дефектности K_θ. Данный коэффициент представляет собой отношение превышения температур зажима к превышению температуры провода, поэтому необходимо использовать известную математическую модель для фазы охлаждения провода МФ-100.

Для этого предлагается совместное решение уравнений известного теплового баланса провода и электрического соединения:

$$K_\theta = \frac{\Delta\theta_c}{\Delta\theta_{пр}} = \frac{(C_з m_з + C_{пр} m_{пр}) \frac{d\theta_c}{dt}}{C_{пр} m_{пр} \frac{d\theta_{пр}}{dt}}, \quad (4)$$

где $\Delta\theta_c$ – превышение температуры электрического соединения над температурой окружающего воздуха при протекании тока, ^{0}C ; $\Delta\theta_{пр}$ – превышение температуры соединяемого провода вне зажима над температурой окружающего воздуха при протекании тока, ^{0}C.

Поскольку известны математические модели нагрева и охлаждения для провода и электрического соединения (см. рис.2, *а*), то можно исследовать изменение коэффициента K_θ от времени в цикле «нагрев-охлаждение» и рассмотреть дополнительные факторы, влияющие на оценку СЭС.

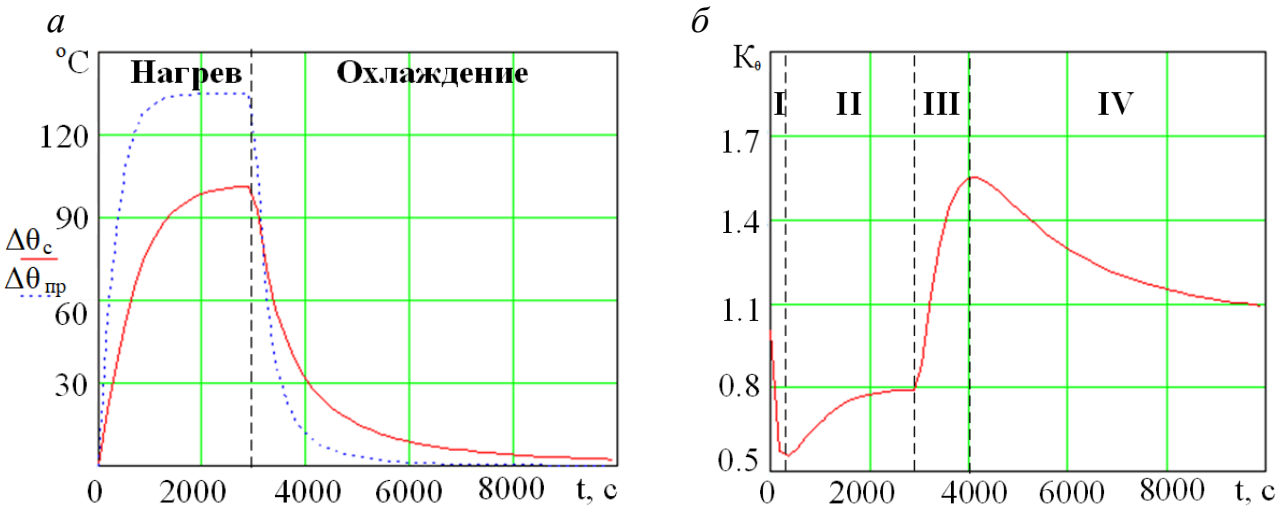

Рис. 2. Кривые изменения превышения температуры ($\Delta\theta_{пр}$ – провода, $\Delta\theta_C$ –электрического соединения) (*а*) и коэффициента дефектности по нагреву K_θ (*б*) в цикле «нагрев – охлаждение» электрического соединения от времени протекания по ним условного номинального тока I = 600 А, при $T_{окр}$ = 24 °С и $R_п$ =25 мкОм

На рис. 2, *б* приведена зависимость изменения кривой коэффициента K_θ, которая состоит из фаз нагрева и охлаждения. В каждой фазе можно выделить характерные области, которые показывают происходящие физические процессы в электрическом соединении при прохождении тока от проводника через контакты соединителя к другому проводнику. Первая область характеризуется инерционностью процесса нагрева соединительного узла, в этом случае температура провода растет с большей скоростью, чем более массивное электрическое соединение. Таким образом, появляется характерная точка минимума.

После точки минимума возникает вторая область, в которой идет процесс достижения установившейся величины коэффициента дефектности по нагреву в связи с преобладанием скорости нагрева электрического соединения по отношению к проводнику, входящими в его состав. В фазе, когда происходит нагревание, величина K_θ будет определяться соотношением переходного электрического сопротивления соединения к погонному сопротивлению целого проводника и соотношением коэффициентов их теплоотдачи.

Третья область представляет собой резкое увеличение коэффициента K_θ с характерной точкой максимума. Такое поведение коэффициента объясняется большей теплоемкостью электрического соединения в отличие от провода.

Важно отметить, что именно в этот момент величина коэффициента K_θ значительно превышает нормируемое значение и равна 1,5, что ранее указывало на неудовлетворительное состояние электрического соединения. При этом значение переходного сопротивления, принимаемое в моделировании 25 мкОм, является нормой.

Итак, доказано, что пренебрегать процессом охлаждения при оценке состояния электрического соединения нельзя, так как это приводит к ложным результатам исследования.

Четвертая область характеризуется остыванием провода с одной скоростью и электрического соединения с другой до температуры окружающей среды. Когда температуры провода и зажима достигнут одного значения $T_{окр}$, они станут равными и величина коэффициента K_θ будет равна единице.

Продолжительность второй области «Период активного изменения коэффициента дефектности» находится в интервале от 5 до 35 минут (рис. 2, *б*, рис. 3). Для этой области характерно то, что в зависимости от величины переходного сопротивления угол Ψ, показывающий скорость увеличения коэффициента дефектности в режиме нагрева (рис. 3) имеет прямую корреляционную зависимость: чем больше переходное сопротивление, тем больше угол.

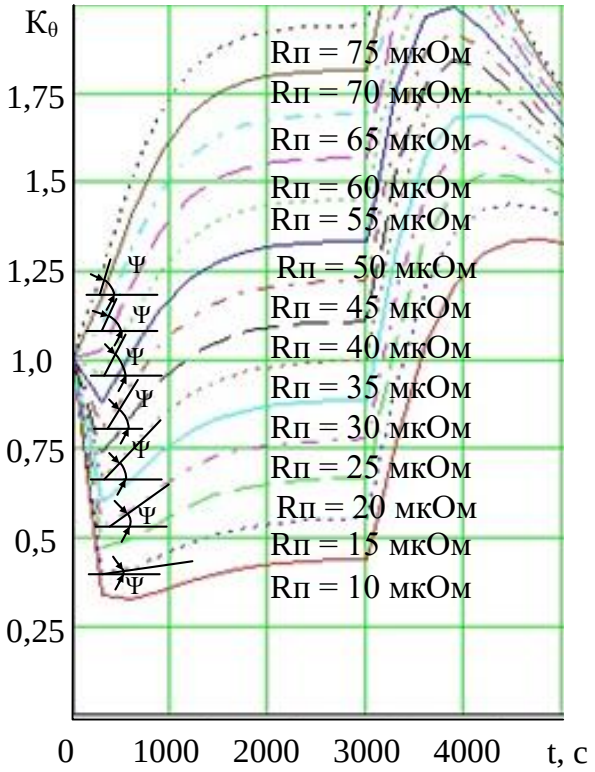

Рис. 3. Кривые коэффициента дефектности K_θ при разной величине переходного сопротивления в зависимости от времени для цикла «нагрев-охлаждение»

Например, при значении $R_п$ = 15 мкОм соответствует угол Ψ = 6,2°, а для $R_п$ = 25 мкОм Ψ =32,6°; для $R_п$= 30 мкОм Ψ = 41,5°; для $R_п$ = 35 мкОм Ψ =5°; для $R_п$= 40 мкОм Ψ =50,7°; для $R_п$= 75 мкОм Ψ =70,9°.

Следовательно, зная величину угла Ψ, можно прогнозировать состояние токопроводящего зажима для всего временного интервала действия электрической нагрузки, что значительно сокращает время диагностирования.

Анализ зависимости коэффициента дефектности K_θ от времени показывает, что его величина может быть показателем величины переходного сопротивления. В ходе моделирования были выявлены критерии определения переходного сопротивления косвенным методом.

В главе 3 представлено проведенное исследование процессов протекания тока в контактной сети постоянного и переменного тока, где показано их распределение по элементам подвески и проведена оценена возможности моделирования переменной по величине тяговой нагрузки.

Для этого было произведено моделирование нескольких циклов действия электрических нагрузок разной величины. По полученной математической

модели создана программа расчета в среде Mathcad (рис. 4), в которой можно при учете процесса охлаждения менять значение действующего тока по величине и времени его действия. Созданная программа позволяет производить расчет дифференциальных уравнений нагрева провода и электрических соединений. По результатам алгоритма работы программы определяется значение $К_\theta$.

В состав программы входят следующие данные. Исходя из временных интервалов, по порядку выбираются 6 значений тока, которые соответствуют переменным I(t), I2(t), I3(t), I4(t), I5(t), I6(t). Выбранные интервалы времени обозначаются переменной – t_m, t_n, t_k, t_d t_c, т.е. это максимальное и минимальное значения переломов графика. Также задается значение переходного сопротивления r, мкОм.

Given

$$(C_з m_з + C_{пр} m_{пр})\, q'(t) = I(t)^2 R_{K20}\left[1 + \alpha(T_{окр} + q(t) - 20)\right] -$$
$$- \left[0{,}1312 \cdot q(t)^{1.4929} + \varepsilon S \sigma \left[(q(t) + 273)^4 - (T_{окр} + 273)^4\right]\right]$$

$$q(0) = 0$$

$$q := \mathrm{Odesolve}(t, tn)$$

$$q_0 := q(tn)$$

$$q_{охл}(t) = \begin{cases} \dfrac{1}{\left(\dfrac{0{,}0108438 \cdot P \cdot (t - tn)}{C_з m_з + C_{пр} m_{пр}} + \dfrac{1}{q_0^{0{,}4929}}\right)^{-2{,}029}}, & \text{if } t > tn \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$q_{заж}(t) := \mathrm{if}(t > tn, q_{охл}(t), q(t))$$

Рис. 4. Фрагмент программного кода для расчета температуры зажима в цикле «нагрев-охлаждение» в программной среде Mathcad

При построении графиков зависимости коэффициента $К_\theta$ от времени (рис. 5) программа сохраняет текущее значение состояния электрического соединения и провода в конце первого цикла, что является исходной точкой расчета следующего цикла.

Для получения реальных данных работы алгоритма произведены не только расчеты изменения коэффициента дефектности $К_\theta$ при различной величине переходного сопротивления, но и произведено изменение величины протекающего тока для работы электрического соединения в режимах нагрев и охлаждение.

По полученным результатам расчетов можно сделать следующий вывод.

В случае охлаждения электрического соединения значение величины коэффициента K_θ может превышать допустимую величину, используемую для оценки удовлетворительного и неудовлетворительного состояния электрического соединения.

Для исследования зависимости угла Ψ от переходного сопротивления $R_п$ построен график (рис. 5) в программной среде Mathcad.

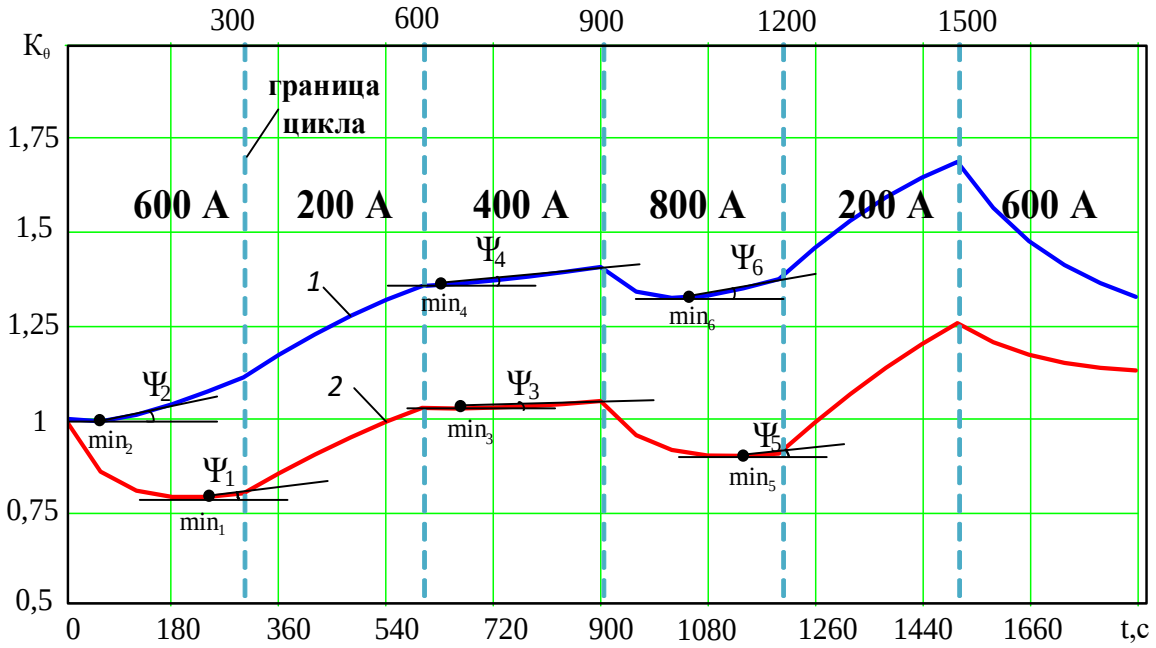

Рис.5. Кривые коэффициента дефектности K_θ при действии тока разной величины (*1* – Rп = 40 мкОм, *2* – Rп = 25 мкОм)

Зная величину угла Ψ, можно прогнозировать состояние токопроводящего зажима для всего временного интервала действия электрической нагрузки.

Для оценки адекватности математической модели разных циклов проведены экспериментальные исследования нагрева электрических соединений (рис. 6).

Для проведения экспериментальных исследований автором был модернизирован испытательный стенд, который представляет собой электромеханический комплекс, состоящий из механического крепления, соединительного узла и индукционного контура, связанного с источником тока (РИТ-3000).

Устройство РИТ-3000 позволяет подавать ток в испытуемый электрический контур в диапазоне от 0 до 3000 А, что дает возможность нагревать электрическое соединение в широком спектре температур. Контроль подаваемого тока осуществляется амперметром.

Для определения переходного сопротивления контакта предусмотрен микроомметр марки Sonel MMR-630. Переходное сопротивление электрического соединения измеряется при разомкнутом контуре. Для максимальной точности измерение следует проводить не менее трех раз, после этого берется усреднённое

значение полученных сопротивлений. Температура нагрева и распределение поля нагрева электрического соединения фиксируется при помощи тепловизора Fluke Tix500.

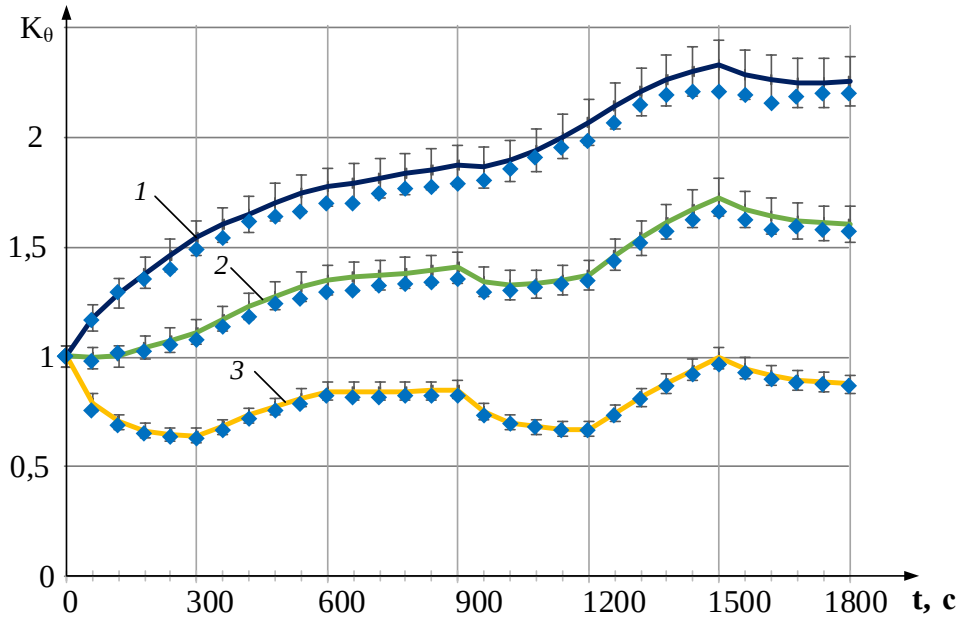

Рис. 6. Кривые коэффициента дефектности K_θ, полученные на основе программного моделировании по результатам экспериментов на физическом стенде:
1 – $R_п$=60 мкОм; *2* – $R_п$=40 мкОм; *3* –$R_п$=17 мкОм; ◆ – эксперимент.

При пропускании тока заданной величины происходит нагрев провода и исследуемого зажима. Весь процесс фиксируется тепловизором, а именно: записывается время нагрева при включении трансформатора и время остывания после отключения трансформатора. Это позволяет зафиксировать и малейшее отклонение температуры от нормы и насколько эффективно соединительная арматура, в отличие от провода, отводит тепло со своей поверхности.

Моделирования эксплуатационных режимов нагрева и охлаждения происходило в реальных условиях при постоянном изменении тока в системе тягового электроснабжения. Для этого нагрев осуществлялся с изменяющейся величиной тока в интервале 5 минут в следующей последовательности: 600, 200, 400, 800, 200, 600 А. Общее время замера составляло 30 минут. Все опыты также были проделаны для значений переходного сопротивления 17, 40 и 60 мкОм (рис. 6).

Результаты эксперимента доказали сопоставимость их значений с математической моделью изменения величины коэффициента K_θ в зависимости от времени. Предел погрешности составляет не более 5 % (границы планок см. на рис. 6).

Следовательно, полученная математическая модель является адекватной.

В главе 4 представлена разработанная методика оценки текущего состояния электрического соединения и произведен расчет экономического эффекта от применения дополнительного диагностирования.

На основании проведенных исследований нагрева электрического соединения была разработана методика для определения состояния электрического соединения.

Из представленного алгоритма методики (рис.7) следует, что учёт и нагрева, и охлаждения дает возможность произвести более точную оценку состояния электрического соединения, при этом пренебрежение даже одним из режимов может привести к ложной оценке.

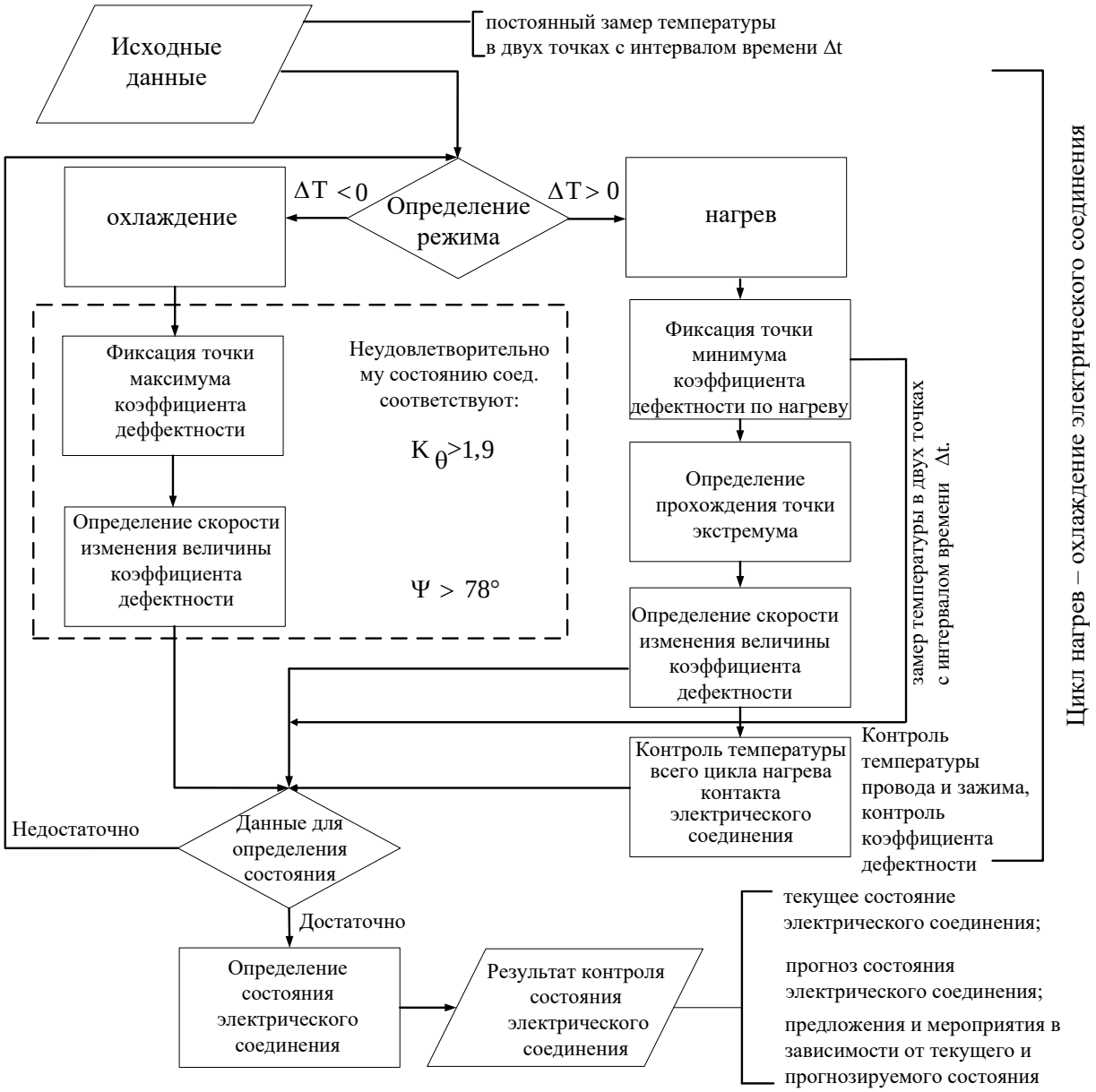

Рис.7. Блок-схема работы алгоритма, позволяющего оценивать текущее состояние электрического соединения и производить его прогноз в условиях эксплуатации

Для автоматизации данного алгоритма предложен метод измерения, в основе которого лежит получение и обработка изображений с тепловизионной камеры. При использовании этого алгоритма можно определить температуру в

точке соединения и на проводе тяговой сети. Эти две точки обрабатываются по представленным моделям, затем выдается результат о текущем состоянии электрического соединения (рис.8).

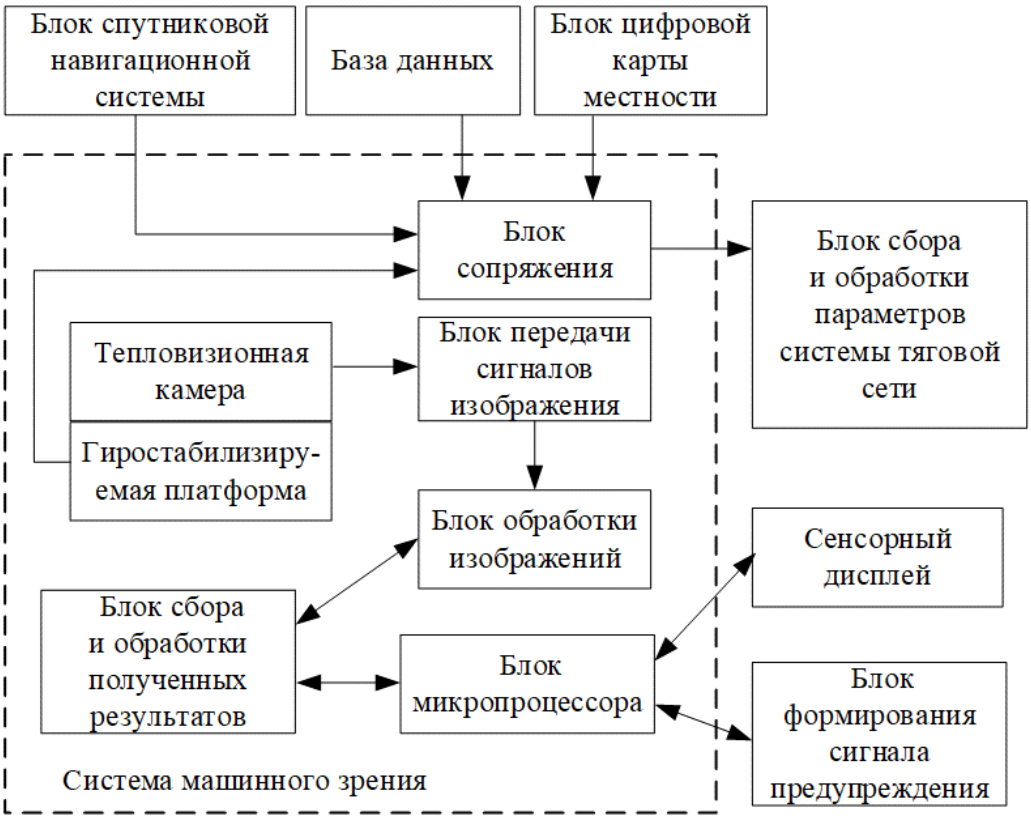

Рис. 8. Структурная схема диагностического комплекса определения СЭС

На основе разработанной методики можно составить алгоритм работы дистанционного метода контроля СЭС.

Полученные данные позволяют не только выявлять характерные особенности СЭС в эксплуатационном режиме, но и в будущем создать стационарные и передвижные измерительные комплексы диагностирования соединительных элементов тяговой сети, что в значительной степени снизит ущерб возникновения перерывов в движении поездов. Более того, внедрение этих технических устройств позволит повысить энергоэффективность работы электрифицированных железных дорог, а также своевременно определять повреждённые участки тяговой сети, производя при этом изменение схем питания СТЭ в целях обеспечения бесперебойной работы.

Основными показателями, характеризующими эффективность внедрения, является интегральный экономический эффект (чистый дисконтированный доход), а также срок окупаемости единовременных затрат, который составил 240,948 тыс.руб. в год с одного аппарата, при этом срок окупаемости составит 2,8 года. Также предлагаемая методика оценки состояния болтового электрического соединения позволяет повысить работоспособность СТЭ на 125 МВт·ч/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Надёжность работы системы тягового электроснабжения зависит от эффективной работы ее элементов. Согласно статистическим данным повреждаемости СТЭ электрические соединения являются важным элементом, от работы которого зависит работоспособность всей системы. Существующие методы диагностики не позволяют оценить СЭС в эксплуатации в силу невозможности определять фактическое переходное сопротивление.

2. Предложена расчетная формула превышения температуры болтового электрического соединения от начального превышения температуры при его охлаждении.

3. Разработана математическая модель, описывающая изменение коэффициента дефектности K_θ в зависимости от интервалов времени для цикла нагрев-охлаждение, что позволяет исследовать нестационарные режимы изменения коэффициента во время пропуска тока по электрическому соединению при различных токовых значениях.

4. Контроль за временным интервалом нагрева электрического соединения и анализ изменения зависимости коэффициента дефектности K_θ позволил установить дополнительные критерии оценки СЭС (токопроводящего питающего зажима): характерная точка минимума, угол Ψ и сама величина коэффициента дефектности для фазы нагрева и охлаждения; а также установлена их корреляционная зависимость с величиной переходного сопротивления. Проведен эксперимент в лабораторных и натурных условиях, подтверждающий теоретические предположения о том, что изменение коэффициента дефектности K_θ в зависимости от времени носит закономерный характер и зависит от величины переходного сопротивления.

5. В математической среде Mathcad разработана программа для расчета изменения коэффициента дефектности для серии циклов «нагрев-охлаждение», имитирующих резко-переменный характер тяговой нагрузки. Разработана методика для проведения исследования, позволяющая оценивать текущее СЭС в условиях циклической тяговой нагрузки.

6. Предложена усовершенствованная система мониторинга и контроля электрического соединения, которая позволит за счет критериального подхода повысить работоспособность системы тягового электроснабжения на 125 МВтч/год, а срок окупаемости при этом составит 2,8 года.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, входящие в международную систему цитирования Scopus

1. Ignatenko I V and Vlasenko S A Determination of criteria to find the quality of an electrical connection 2016 *Russian Electrical Eng*. 87(2) 65-67.

2. Ignatenko I., Vlasenko S. Diagnostics of Electrical Connections of Electric Traction Network. TransSiberia 2019, AISC 1115, pp. 69–78, 2020.

Статьи в журналах и изданиях перечня ВАК Российской Федерации

3. Игнатенко, И.В. Новый подход к оценке состояния электрического соединения / И.В. Игнатенко, С.А. Власенко, Р.С. Кавлак // Энергетик. Изд-во НТФ «Энергопрогресс».– 2017.–№ 5. С. 21 - 24.

4. Игнатенко, И.В. Определение критериев оценки качества электрического соединения / И. В. Игнатенко, С.А. Власенко // Электротехника. – 2016. – № 2. – С. 9–11.

Патенты

5. Пат. 2659671 Российская Федерация, МПК B60M 3/02 (01.2006) H02J 3/12 (2006.01). Система электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ / Н.П. Григорьев, А.П. Парфианович, И.В. Игнатенко, С.А. Власенко; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т. путей сообщения. – № 2016150010; заявл. 19.12.2016; опубл; 20.06.2018, Бюл. № 19. – 16 с. : ил.

6. Пат. 2661628 Российская Федерация, МПК B60M 3/02 (01.2006). Система электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ / Н.П. Григорьев, А.П. Парфианович, И.В. Игнатенко, С.А. Власенко; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т. путей сообщения. – № 2017108336; заявл. 13.03.2017; опубл; 17.07.2018, Бюл. № 20. – 12 с. : ил.

Прочие публикации

7. Игнатенко, И.В. Проблемы определения качества электрического соединения / И. В. Игнатенко, С.А. Власенко // Транспорт азиатско-тихоокеанского региона. – 2015. – №1(2,3). – С. 32–35.

8. Григорьев, Н.П. Нормальные схемы питания тяговых нагрузок / Н.П. Григорьев, С.А. Власенко, А.П. Парфианович // Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. В 3 т. Т 2. / под ред. С.М. Гончарука. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 63–69.

9. Игнатенко, И. В. Причины отказа болтового электрического соединения / И.В. Игнатенко, С.А. Власенко // Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы: тр. всерос. науч.-практ. конф., г. Хабаровск, 19-20 ноября 2015 г. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 40–45.

10. Игнатенко, И.В. Повышение эксплуатационной надежности токопроводящих зажимов контактной сети электрифицированных железных дорог : монография / И.В. Игнатенко, С.А. Власенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2016. – 116 с.

11. Игнатенко, И.В. Новый подход к оценке переходного электрического сопротивления плашечного болтового зажима / И.В. Игнатенко, С.А. Власенко, Р.С. Кавлак // Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов: сб. материалов международной заочной научно-практической конференции. – Биробиджан : Изд-во ПГУ им. Шолом-Алейхема. 2017. С. 73–80.

12. Власенко, С.А. Повышение энергоэффективности работы электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ выбором нормальных схем питания тяговых нагрузок / С.А. Власенко, Н.П. Григорьев, А.П. Парфианович // Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта : материалы VII

междунар. симп. «Элтранс-2015», 7–9 окт. 2015 г., Санкт-Петербург. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. – С. 88–92.

13. Власенко, С.А. Определение переходного сопротивления электрических соединений системы тягового электроснабжения в процессе эксплуатации / С.А. Власенко // Молодые ученые - Хабаровскому краю: материалы XIX краевого конкурса молодых ученых и аспирантов.– Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2017. – С. 163–171.

14. Игнатенко, И. В. Оценка переходного электрического сопротивления плашечного болтового зажима / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, Р. С. Кавлак // Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. – Биробиджан : Изд-во ПГУ им. Шолом-Алейхема, 2017. –№ 1. – С. 21–27.

15. Власенко, С.А. Определение состояния электрического соединения при действии токов разной величины / С.А. Власенко, Р.С. Кавлак, И.В. Игнатенко // Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. В 2 томах: Т.1. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2017. – С. 61–64.

16. Игнатенко, И. В. Выявление характерных особенностей определения состояния электрического соединения в эксплуатационном режиме/ И.В. Игнатенко, С.А. Власенко // Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. В 2 томах: Т.1. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2018. – С. 181–184.

17. Игнатенко, И.В. Оценка состояния электрического соединения для нестационарных режимов работы системы тягового электроснабжения / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко // Eltrans 10.0 тез. докладов Десятого международного симпозиума «Eltrans 10.0», посвященного 210-летию со дня основания первого транспортного вуза России - Петербургского гос. ун-та путей сообщения им. Императора Александра I, 9–11 октября 2019 г., Санкт-Петербург. В 2 частях. Часть 1. – СПб.: Изд-во ФГБОУ ВО ПГУПС.– 2019. – С. 84–86.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Власенко Сергей Анатольевич

План 20__ г. Подписано в печать
Уч.-изд. л. _____. Усл. печ. л. _____. Зак. ___. Тираж 100 экз.

Издательство ДВГУПС
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47