

На правах рукописи



КУШНИРУК Алексей Сергеевич

**ДИАГНОСТИКА МОТОРНО-ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ
КОЛЕСНО-МОТОРНОГО БЛОКА С НЕЙРОСЕТЕВОЙ ЭТАЛОННОЙ
МОДЕЛЮ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» на кафедре «Транспорт железных дорог»

Научный руководитель: **Пляскин Артем Константинович**,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Лакин Игорь Капитонович**,
доктор технических наук, профессор, старший советник по науке ОАО «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта»;

Базилевский Федор Юрьевич,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится 29 июня 2021 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 218.003.07, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС) по адресу: 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47, аудитория 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Дальневосточного государственного университета путей сообщения или на его веб-сайте www.dvgups.ru.

Автореферат разослан «27» апреля 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Ю. С. Кабалык

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Моторно-осевые подшипники являются ответственным и связующим звеном важнейших, с точки зрения безопасности, узлов локомотивов. Поэтому достоверное и своевременное определение технического состояния моторно-осевых подшипников является насущной задачей для предприятий, занимающихся эксплуатацией и ремонтом данного узла.

Несмотря на необходимость своевременной диагностики моторно-осевых подшипников, периоды между проведением диагностических работ принимают значительные пробеги (свыше 400 тыс. км пробега), что отрицательно сказывается на количестве отказов. Ежегодно на Дальневосточной железной дороге отказы по данному узлу составляют свыше 200 случаев, что впоследствии сказывается на повышении экономических потерь и снижении производительности локомотивного парка. В среднем затраты на устранение последствий неплановых ремонтов моторно-осевых подшипников составляют 14,5 млн. рублей в год без учета затрат на компенсацию грузополучателям.

В совокупности диагностическую ситуацию усложняет отсутствие каких-либо непрерывных систем диагностики моторно-осевых подшипников. Поэтому назрела необходимость разработки эталонной модели данного узла, позволяющую с высоким уровнем достоверности определять техническое состояние на основании изменения диагностического параметра с учетом влияния внешних факторов.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационное исследование выполнено на основе результатов работ учёных, которые занимались вопросами улучшения надежности локомотивного парка: ОмГУПС: О. В. Гателюк, А. И. Мишин, В. В. Молчанов, С. М. Овчаренко, П. А. Сиряк, Ю. А. Усманов, В. В. Харламов, В. А. Четвергов, С. Г. Шангаренко; НИИТКД: В. М. Бочаров, А. Н. Головаш, В. Г. Шахов; ПГУПС: Ю. В. Бабков, В. В. Грачев, А. В. Грищенко, О. Р. Хамидов, С. И. Чаплинский; ИрГУПС: П. Ю. Иванов, О. В. Мельниченко, А. В. Пультяков; МИИТ: В. А. Гапанович, И. К. Лакин; ДВГУПС: Ю. А. Давыдов, А. Ю. Коньков, А. К. Пляскин, а также другие ученые и специалисты.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности диагностики моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов на основе использования методов теории искусственных нейронных сетей.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы следующие **задачи**:

1. Проанализировать надежность моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотива в условиях работы планово-предупредительной системы ремонта и обслуживания.

2. Разработать эталонную модель моторно-осевых подшипников, позволяющую на основе скорости движения локомотива, его ускорения и температуры воздуха определять допустимую температуру подшипников.

3. Предложить способ диагностирования технического состояния моторно-осевых подшипников, учитывающий условия эксплуатации и режим работы локомотива.

4. Произвести оценку экономического эффекта от использования в локомотивном комплексе способа управления техническим состоянием моторно-осевых подшипников, основанного на построении эталонных нейросетевых моделей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана нейросетевая модель эталонного моторно-осевого подшипника колесно-моторного блока, учитывающая влияние скорости и ускорения локомотива, и температуры воздуха.

2. Предложен способ диагностирования технического состояния моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов на основе вычисления эталонного значения функции диагностических параметров от переменных значений входных влияющих воздействий.

Практическая значимость работы:

1. Применение разработанной методики контроля выходных параметров и диагностирования отказов позволяет выявлять неисправности моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов на ранней стадии их возникновения, с учетом влияния внешних и внутренних воздействий.

2. Разработанная имитационная нейросетевая модель эталонного моторно-осевого подшипника позволяет исследовать влияние внешних и внутренних воздействий на техническое состояние рассматриваемого узла при диагностировании тягового подвижного состава.

3. Разработан алгоритм управления техническим состоянием локомотивов на основе нового способа диагностирования неисправностей узлов и агрегатов, который решает спектр вопросов, связанных с внедрением концепции управления надежностью локомотивного парка.

Объектом исследования являются моторно-осевые подшипники колесно-моторного блока локомотивов.

Предметом исследования являются средства и методы технической диагностики моторно-осевых подшипников локомотивов.

Методы исследования. Полученные в работе результаты базируются на использовании методов теории нечетких множеств, теории искусственных нейронных сетей, теории дифференциальных уравнений, теории вычислительного эксперимента. Проведение математического моделирования осуществлялось с использованием пакета *Neural network* среды *MATLAB*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Нейросетевая модель эталонного моторно-осевого подшипника, учитывающая влияние скорости и ускорения движения локомотива, и температуры

воздуха.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований искусственных нейронных сетей, имеющих прикладное значение в области диагностики моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов.

Достоверность научных положений и результатов обоснованы корректным использованием методов теории нечетких множеств, искусственных нейронных сетей, дифференциальных уравнений, вычислительного эксперимента и удовлетворительным совпадением результатов математического моделирования с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены: на XXIII Краевом конкурсе молодых ученых Хабаровского края (г. Хабаровск, 14 января 2021 г., ТОГУ), XXII Краевом конкурсе молодых ученых Хабаровского края (г. Хабаровск, 21 января 2020 г., ТОГУ); расширенном научно-техническом семинаре кафедры «Электроподвижной состав» (г. Иркутск, 10 декабря 2019 г., ИрГУПС); XXI Краевом конкурсе молодых ученых Хабаровского края (г. Хабаровск, 18 января 2019 г., ТОГУ); международной научной конференции «Инновационные технологии развития транспортной отрасли» (г. Хабаровск, 24–26 октября 2019 г., ДВГУПС); Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» (г. Хабаровск, 17–19 апреля 2018 г., ДВГУПС); научно-техническом семинаре кафедры «Транспорт железных дорог» (г. Хабаровск, 21 ноября 2018 г., ДВГУПС).

Личный вклад автора заключается в разработке и выполнению математического исследования искусственной нейронной сети в системе технической диагностики моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов; разработке способа совершенствования системы диагностики неисправностей моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов; технико-экономической оценке реализации фактической системы управления надежностью на примере лимитирующего узла – моторно-осевого подшипника колесно-моторного блока локомотива.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе 5 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки, и 1 статья, входящая в международную систему цитирования *Scopus*.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников из 121 наименования и приложений. Текст диссертации изложен на 155 страницах, содержит 37 рисунков, 24 таблицы, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено состояние проблемы надежности локомотивного парка, обоснована актуальность и значимость выбранной темы диссертации, сформулированы цели, определены практическая ценность и научная новизна работы.

В первой главе проведен обзор текущей диагностической ситуации относительно моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов. Выполнен анализ методов диагностирования в условиях эксплуатации планово-предупредительной системы ремонта и обслуживания локомотивов, определены их достоинства и недостатки. Проведено исследование научных подходов при диагностике технического состояния узлов локомотивов в целом и моторно-осевых подшипников в частности.

Известны исследования ученых ОмГУПС, которые теоретически обосновали применение планово-предупредительной системы ремонта и обслуживания локомотивов посредством классической теории надежности, основанной на математической статистике и теории вероятностей.

Ученые ИрГУПС достигли высоких результатов в области диагностики технического состояния с применением стационарных систем контроля отдельных узлов локомотивов, работа которых основана на регрессионных параметрических моделях вычисления значений функции диагностического параметра.

Учеными МИИТ была разработана модель управления техническим состоянием узлов локомотивов на основе теории нечетких множеств, а также теории параметрической надежности (раздела классической теории надежности) посредством алгоритмов управления рисками.

Известны работы ученых ПГУПС, обосновывающие применение теории искусственного интеллекта в развитии систем управления надежностью отдельных узлов локомотива.

В результате проведенного анализа существующих методов непрерывной диагностики технического состояния установлены их достоинства и недостатки, а также сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе, на основании статистического анализа отказов локомотивов, аргументирована необходимость перехода на фактическую систему обслуживания и ремонта узлов локомотивов с применением непрерывных комплексных систем технического контроля и диагностирования. Определен лимитирующий узел локомотивов – моторно-осевой подшипник колесно-моторного блока. Количество отказов данного узла значительно в сравнении с другими узлами тягового подвижного состава.

Определена средняя наработка на отказ $L=2,54$ тыс. км, которая обосновывает необходимость проведения диагностических работ по рассматриваемому узлу до момента достижения определенного пробега. На текущий момент времени, согласно планово-предупредительной системе ремонта и обслуживания, диагностика моторно-осевых подшипников проводится на текущем и

среднем видах ремонта объемов ТР-3 и СР, пробеги по которым варьируются от 400 тыс. км до 1200 тыс. км для грузовых и пассажирских локомотивов. Ввиду того, что определенная наработка на отказ L обуславливает проведение диагностических работ с достаточно низким периодом дискретизации (менее чем через 2 тыс. км), что отрицательно сказывается на производительности локомотивного хозяйства, необходима разработка фактической модели диагностики технического состояния данного узла, которую возможно применять в составе непрерывных бортовых систем мониторинга, контроля и диагностирования с целью обслуживания и ремонта рассматриваемого узла по состоянию.

Проведено исследование гипотезы о распределении отказов рассматриваемого узла локомотива по нормальному, экспоненциальному, Вейбулловскому законам согласно критерию Пирсона. Исследование данных законов распределения было принято для рассматриваемого узла согласно ОСТ 32.70–96 «Тепловозы. Система сбора и обработки информации о надежности с мест эксплуатации». Рассматриваемые гипотезы были отвергнуты вследствие того, что рассчитанные значения критерия Пирсона составляют $\chi^2 = 69,4$ при исследовании гипотезы о нормальном законе распределении, $\chi^2 = 64,5$ – при экспоненциальном и $\chi^2 = 46,6$ – при распределении Вейбулла-Гнеденко, и больше значения критической точки для уровня значимости 5 %. Отвергнутые гипотезы свидетельствуют о невозможности прогнозирования частот отказов на промежуток времени с доверительным уровнем значимости. Соответственно, отвергается возможность управления отказами в рамках планово-предупредительной системы ремонта и обслуживания локомотивов.

В третьей главе представлена разработанная непрерывная модель диагностики технического состояния моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов, которая реализована в пакете *Neural network* среды *MATLAB*.

Модель диагностики технического состояния моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов представляет собой однонаправленную многослойную искусственную нейронную сеть с одним скрытым слоем и двумя функциями активации – сигмовидной и линейной соответственно. Применение сигмовидной функции обосновано усилением слабых сигналов и исключением насыщения мощных. Линейная функция применялась с целью проведения линейного регрессионного анализа для определения качества обучения искусственной нейронной сети. В качестве алгоритма обучения искусственной нейронной сети использовался метод Левенберга–Марквардта, который основан на синтезе двух алгоритмов минимизации функции – алгоритме наискорейшего спуска и алгоритме Гаусса–Ньютона.

Структура разработанной искусственной однонаправленной многослойной нейронной сети представлена на рисунке 1.

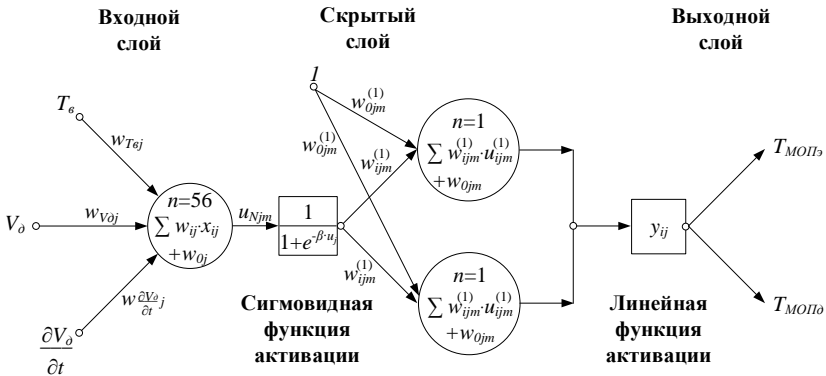


Рис. 1. Структура искусственной однонаправленной многослойной нейронной сети, где T_e – температура условий эксплуатации; V_δ – скорость движения; V_δ' – ускорение

Выбор входных параметров нейронной сети, а именно температуры условий эксплуатации T_e , скорости движения локомотива V_δ и ускорения V_δ' , обоснован их корреляционной связью с диагностическими выходными параметрами – температурой вкладыша исправного вкладыша моторно-осевого подшипника (эталонного) $T_{МОПз}$ и температурой вкладыша моторно-осевого подшипника с дефектом (проточка баббитового слоя) $T_{МОПδ}$. Согласно шкале Чеддока, рассматриваемые признаки имеют заметные и высокие связи, что обосновывает применение рассматриваемых входных параметров.

На основании принятых входных и выходных параметров, данных мониторинга, разработанной структуры, экспериментально определенного количества персептронов, принятого алгоритма минимизации функции искусственной нейронной сети проведено 1500 итераций ее обучения.

Результаты обучения искусственной нейронной сети в виде зависимости линейного регрессионного анализа между ответом нейронной сети и фактическим выходным параметром обучения представлены на рисунке 2.

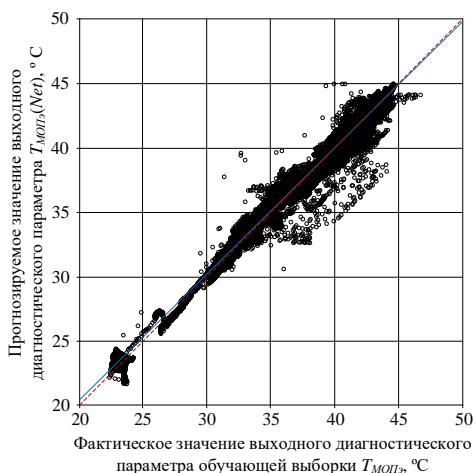


Рис. 2. Линейный регрессионный анализ нейронной сети Net, где — линия регрессии сети, - - - линия регрессии вида $T_{MOPz}(Net)=T_{MOPz}$

В результате обучения искусственной нейронной сети по выборке обучения объемом в 671400 точек достигнут коэффициент детерминации $R^2=0,98$. Процесс обучения длился 1 час 14 минут.

Так как обученная нейронная сеть имеет высокий уровень сходимости, разработанная модель позволяет вычислить значения диагностических параметров в зависимости от входных данных.

Разработанная универсальная непрерывная искусственная нейросетевая модель диагностики способна к комплексному контролю и диагностированию отказов моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов.

Четвертая глава посвящена исследованию работы искусственной нейронной сети по экспериментальной выборке данных. Результаты работы искусственной нейронной сети представлены на рисунке 3.

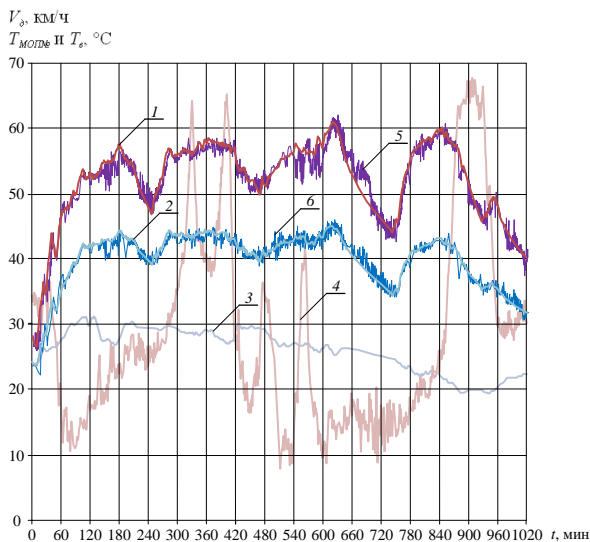


Рис. 3. Результаты исследования работы нейросетевой модели диагностики моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов: 1 – температура дефектного (проточка баббитового слоя) моторно-осевого подшипника $T_{МОПд}$, °C; 2 – температура эталонного (исправного) моторно-осевого подшипника $T_{МОПэ}$, °C; 3 – температура воздуха (условий эксплуатации) $T_э$, °C; 4 – скорость движения локомотива $V_δ$, км/ч; 5 – температура эталонного подшипника, вычисляемая сетью $T_{МОПэ}(Net)$, °C; 6 – температура дефектного подшипника, вычисляемая сетью $T_{МОПд}(Net)$, °C; t – время регистрации данных, мин

Полученная аппроксимированная функция изменения диагностического параметра $T_{МОПд}$ ($T_{МОПэ}$)= $Net(V_δ, V_δ', T_э)$ описывает реальную $T_{МОПд}$ ($T_{МОПэ}$) = $f(V_δ, V_δ', T_э)$, при этом присутствует эффект шумового воздействия, вызванный характером изменения входных параметров (в частности – скорости и ускорения). Для подавления данного шумового воздействия разработан фильтр высокой интенсивности, работа которого основана на исключении тех значений диагностического параметра и приравнивании их к предыдущему, интенсивность нарастания (снижения) которых выше максимальной зафиксированной на рассматриваемой выборке и на текущий момент времени согласно данным мониторинга:

$$\frac{\partial y_z}{\partial t} > (<) \frac{\partial a_{\max(\min)}}{\partial t}, \quad y_z = y_{z-1}, \quad (1)$$

где $\frac{\partial a_{\max(\min)}}{\partial t}$ – максимальная или минимальная интенсивность изменения фактического значения выходного диагностического параметра;

y_z – текущее аппроксимированное значение ответа нейронной сети по выходному диагностическому параметру;

y_{z-1} – предыдущее аппроксимированное значение ответа нейронной сети по выходному диагностическому параметру.

Результаты исследования нейронной сети с учетом работы фильтра высокой интенсивности (б) представлены на рисунке 4.

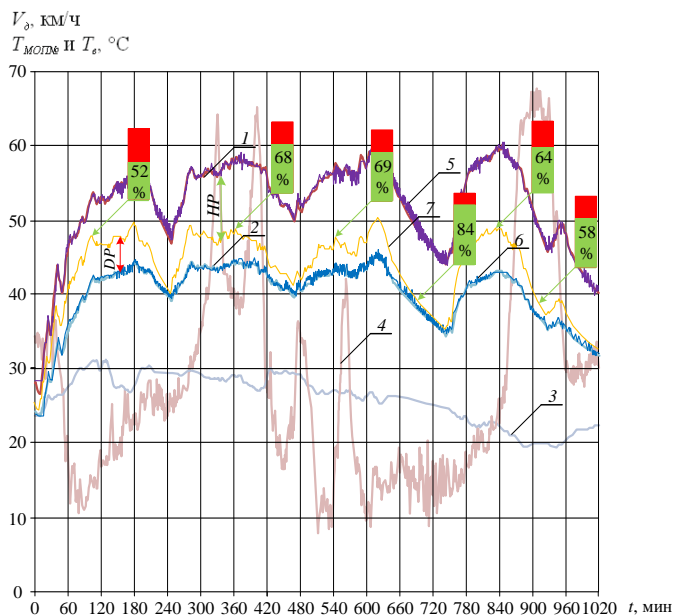


Рис. 4. Функция принадлежности отказа (проточка баббитового слоя) МОП:

1 – температура дефектного (проточка баббитового слоя) моторно-осевого подшипника $T_{МОПд}$, °С; 2 – температура эталонного (исправного) моторно-осевого подшипника $T_{МОПэ}$, °С; 3 – температура воздуха (условий эксплуатации) T_a , °С; 4 – скорость движения локомотива V_{∂} , км/ч; 5 – температура эталонного подшипника, вычисляемая сетью $T_{МОПэ}(Net)$, °С; 6 – температура дефектного подшипника, вычисляемая сетью $T_{МОПд}(Net)$, °С; 7 – фактическое значение температуры диагностируемого подшипника $T_{МОП}$, °С; t – время регистрации данных, мин

На основании проведенного исследования обученной нейронной сети доказано, что разработанная модель позволяет осуществлять комплексный контроль и диагностирование отказов рассматриваемого узла с высокой точностью вычисления диагностического параметра.

На основании полученных диагностических характеристик реализована система диагностики технического состояния на основе построения функций принадлежности конкретных отказов моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов, которая проста для интеллектуальной обработки и отображения в бортовых и удаленных системах контроля и диагностирования.

На рисунке 6 представлен процесс непрерывного контроля технического состояния моторно-осевых подшипников на основе его нейросетевой диагностической характеристики, при этом относительный показатель технического состояния HP в любой точке представляет собой отношение разницы ответа дефектной сети и фактического значения температуры вкладыша к разнице между ответом дефектной и эталонной сети:

$$HP = \frac{T_{МОП\delta}(Net) - T_{МОП}}{T_{МОП\delta}(Net) - T_{МОП\epsilon}(Net)}, \quad (2)$$

где $T_{МОП}$ – фактическое значение температуры диагностируемого подшипника (обозначено как – — на рисунке 4), °C.

При этом на рисунке 4 имеется как возрастание, так и убывание показателя технического состояния, что является неоднозначным фактом при визуализации диагностических данных. Поэтому при расчете показателей технического состояния HP необходимо учитывать условие: если очередное значение показателя технического состояния HP больше минимального значения, то это значение приравнивается к минимальному рассчитанному на зарегистрированной выборке. Тогда управляющая характеристика изменения технического состояния примет следующий вид (Рис. 5).

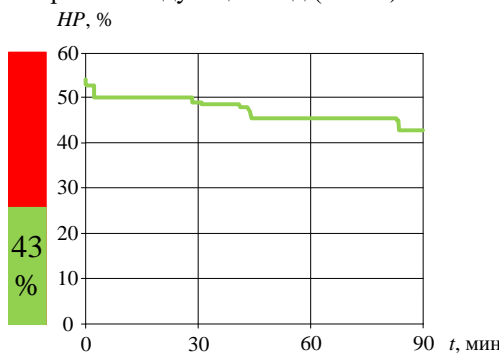


Рис. 5. Управляющая характеристика изменения технического состояния МОП

Управление техническим состоянием моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов осуществляется путем определения допустимых и критических значения показателя HP , при этом $HP=0\%$, $DP=100\%$ соответствует достижению фактического диагностического параметра узла дефектной точки искусственной нейросетевой диагностической характеристики, что подтверждает факт конкретного отказа. Опре-

деление допустимых и критических значений показателя HP может осуществляться на основании экспертных заключений отдела расшифровки памяти микропроцессорных систем управления и диагностики, на основании данных о неплановых ремонтах, отчетах об обслуживании и ремонте рассматриваемого узла.

Таким образом, посредством разработанного в диссертационной работе способа диагностирования и контроля моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов, с помощью одного параметра HP , можно осуществлять управление техническим состоянием рассматриваемого узла с учетом изменения множества входных и выходных технических параметров.

В соответствии с разработанной моделью был построен алгоритм управления техническим состоянием моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов (Рис. 6).

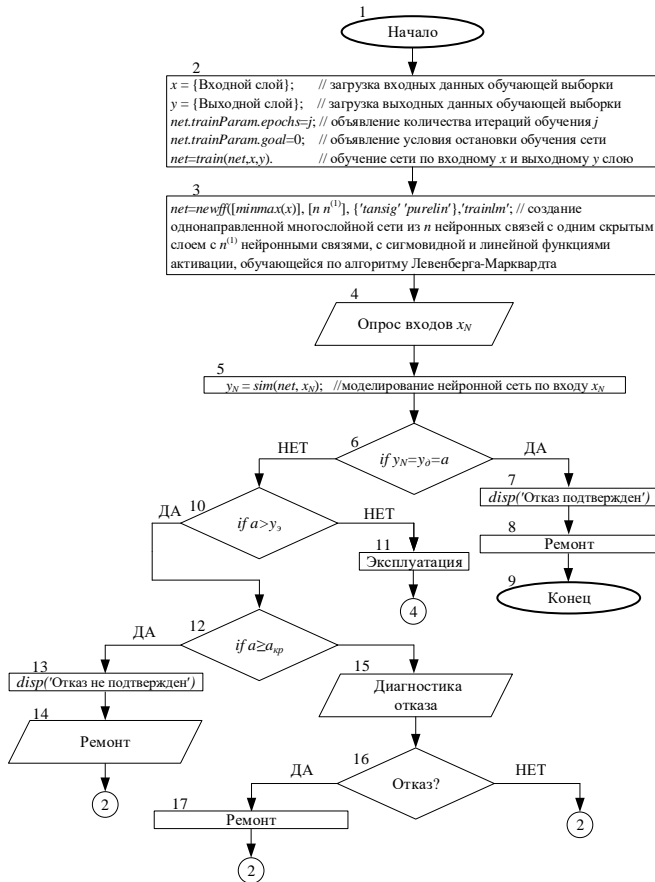


Рис. 6. Алгоритм управления техническим состоянием моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов

Обученная нейронная сеть принимает входные сигналы x_N блока 4 средств мониторинга – датчиков температуры и скорости движения локомотива. На основании входных сигналов x_N определяются значения выходных диагностических параметров y_N блока 5 – температуры моторно-осевых подшипни-

ков с дефектом и без дефекта. В блоке 6 реализован процесс идентификации отказа по выходным фактическим диагностическим значениям a рассматриваемого узла с помощью обученной дефектной нейронной сети с выходным параметром y_0 , при этом в блоке 12 осуществляется контроль по критическому (предельному) значению диагностического параметра $a_{кр}$ с последующим обучением по выявленному и устраненному отказу 14. Если фактические значения диагностического параметра a , зарегистрированные средствами мониторинга, принимают характеристику изменения ответа дефектной нейронной сети с выходным параметром y_0 , то рассматриваемый узел имеет соответствующий отказ, для устранения которого необходимо проведение ремонтных операций. В случае если фактическое значение выходного диагностического параметра не является явным ($a \neq y_0$, $a > y_0$), необходимо проведение дополнительных диагностических работ 15 с целью подтверждения или опровержения отказа с дальнейшим обучением сети по зарегистрированной выборке.

Оценен экономический эффект от использования в локомотивном комплексе методики управления техническим состоянием МОР локомотивов, основанной на построении нейросетевых моделей. Капитальные вложения на оборудование локомотивного парка Дальневосточной железной дороги составляют 119,13 млн. руб. При этом экономический эффект от снижения затрат на неплановые ремонты локомотивов за год составит 14,51 млн. руб. Срок окупаемости разработанной системы составит 8 лет и 2 месяца.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Произведен анализ надежности узлов локомотивов. Установлено, что узлом, лимитирующим установленные нормы межремонтных пробегов локомотивов, являются моторно-осевые подшипники как у тепловозного парка, так и у обновленного электроподвижного состава. Произведен расчет показателей безотказности моторно-осевых подшипников. Средняя наработка на отказ данного узла составляет $L=2,54$ тыс. км при проведении работ по диагностике технического состояния через $L_{\phi}=400$ тыс. км. Проведено исследование гипотез о распределении отказов моторно-осевых подшипников по нормальному, экспоненциальному и Вейбулловскому законам распределения согласно критерию Пирсона. Рассматриваемые гипотезы были отвергнуты, что согласно ОСТ 32.70–96 свидетельствует о нестабильности изменения показателей надежности данного узла.

2. Разработана эталонная модель моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов, которая позволяет с низким периодом дискретизации $T_0=1$ с и высоким уровнем регрессии $R^2=0,98$ вычислять изменение входных диагностических параметров с учетом влияния входных воздействий. Разработанная модель рассматривалась на примере моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотива и является искусственной однонаправленной многослойной нейронной сетью с одним скрытым слоем и двумя функциями активации – сигмовидной и линейной соответственно. В качестве входного слоя рассматривались и были приняты в соответствии с результатами кор-

реляционного анализа следующие входные параметры – температура условий эксплуатации T_{es} , скорость движения V_o , ускорение V_o' . Коэффициенты корреляции R по данным параметрам по отношению к выходным диагностическим параметрам $T_{МОП}$ и $T_{МОП}$ согласно шкале Чеддока подтверждают умеренные и высокие связи.

3. Проведено исследование разработанной модели на адекватность вычисления выходных параметров. Несмотря на высокий уровень регрессии, по выходному слою наблюдаются шумовые воздействия, характеризующиеся интенсивностью изменения входных данных. Для подавления данного шумового воздействия разработан фильтр высокой интенсивности. На основании проведенного исследования обученной искусственной нейронной сети, с учетом работы фильтра высокой интенсивности, подтверждена адекватность работы модели. Предложен способ диагностирования технического состояния моторно-осевых подшипников, работающий на основе представленной модели. На основании разработанной модели построен алгоритм управления техническим состоянием моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов. Алгоритм включает в себя контроль технического состояния моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотивов по значению выходного параметра с учетом влияния входных воздействий, а также распознавание отказов посредством дефектной искусственной нейронной сети.

4. Оценен экономический эффект от использования в локомотивном комплексе способа управления техническим состоянием МОП локомотивов, основанного на построении эталонных нейросетевых моделей. Капитальные вложения на оборудование локомотивного парка Дальневосточной железной дороги составляют 119,13 млн. руб. При этом экономический эффект от снижения затрат на неплановые ремонты локомотивов за год составит 14,51 млн. руб. Срок окупаемости разработанной системы составит 8 лет и 2 месяца.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в журналах и изданиях перечня ВАК Российской Федерации:

1. Давыдов, Ю. А. Распознавание дефектов моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотива на основе результатов моделирования искусственной нейронной сети прогнозирования выходных диагностических параметров / Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин, А. С. Кушнирук / Известия Транссиба – Омск, 2020. – № 2 (42). – с. 44–52.

2. Кушнирук, А. С. Система управления техническим состоянием локомотивного парка на основе искусственной нейронной сети прогнозирования / А. С. Кушнирук / Известия Транссиба – Омск, 2020. – № 1(41). – с. 72–83.

3. Пляскин, А. К. Управление рисками отказов локомотивов / А. К. Пляскин, А. С. Кушнирук / Железнодорожный транспорт – Москва, 2019. – № 6. – с. 40–42.

4. Пляскин, А. К. Особенности применения технологии информационного моделирования для мониторинга фактического технического состояния локо-

мотивов / А. К. Пляскин, А. С. Кушнирук / Бюллетень результатов научных исследований – Санкт-Петербург, 2019. – № 2. – с. 58–71.

5. Давыдов, Ю. А. Контроль фактического технического состояния локомотивов на основе диагностики / Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин, А. С. Кушнирук / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование – Иркутск, 2018. – № 3. – с. 38–47.

Статья, входящая в международную систему цитирования Scopus:

6. А. К. Plyaskin, A. S. Kushniruk. Actual artificial intelligence based system for assessment of the technical state of the rolling stock fleet / *Advances in Intelligent systems and computing*, 2020, Volume 1115, pp 427–442.

Прочие публикации:

7. Кушнирук, А. С. Анализ показателей безотказности моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотива на полигоне эксплуатации Дальневосточной железной дороги / А. С. Кушнирук / Транспорт Азиатского-Тихоокеанского региона – Хабаровск, 2020. № 3 (24). с. 18–20.

8. Пляскин, А. К. Исследование гипотез о распределении отказов моторно-осевых подшипников колесно-моторного блока локомотива на полигоне Дальневосточной железной дороги / А. К. Пляскин, А. С. Кушнирук / Транспорт Азиатского-Тихоокеанского региона – Хабаровск, 2020. № 3 (24). с. 13–17.

9. Пляскин, А. К. Организация дистанционного технического мониторинга локомотивов / А. К. Пляскин, А. С. Кушнирук / труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием – Хабаровск, 2018. – с. 27–31.

10. Пляскин, А. К. Современные системы диагностирования локомотивов / А. К. Пляскин, А. С. Кушнирук / Вестник Института тяги и подвижного состава – Хабаровск, 2017. № 13. – с. 3–5.

КУШНИРУК Алексей Сергеевич

**ДИАГНОСТИКА МОТОРНО-ОСЕВЫХ ПОДШИПНИКОВ
КОЛЕСНО-МОТОРНОГО БЛОКА С НЕЙРОСЕТЕВОЙ ЭТАЛОННОЙ
МОДЕЛЬЮ**

Специальность 05.22.07 — Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 27.04.2021 г. Формат 60×84¹/₁₆. Гарнитура «Times New Roman».
Уч.-изд. л. 1,0. Усл. печ. л. 0,93. Зак. 101. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Издательстве ДВГУПС.
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.