

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна

На правах рукописи

ШВЕЦ ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 625.151.32 + 519.711.2

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАРКОВ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТРЕЛОЧНЫХ
ПЕРЕВОДОВ СРЕДСТВАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Скалозуб Владислав Васильевич
д.т.н., профессор

Днепропетровск – 2012

СОДЕРЖАНИЕ

<u>ВВЕДЕНИЕ</u>	7
<u>РАЗДЕЛ 1 Проблемы эксплуатации по текущему состоянию парков электродвигателей стрелочных переводов</u>	15
<u>1.1 Роль стрелочных электроприводов в обеспечении безопасности движения на железной дороге. Анализ данных статистики об отказах стрелок электрической централизации</u>	15
<u>1.2 Анализ причин отказов и возможностей диагностирования стрелочных электроприводов</u>	20
<u>1.3 Применяемые методы эксплуатации электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов</u>	24
<u>1.4 Существующие технологии и методы диагностирования стрелочных электроприводов</u>	28
<u>Выводы</u>	37
<u>РАЗДЕЛ 2 Разработка автоматизированной технологии управления эксплуатацией по текущему состоянию парка электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов</u>	39
<u>2.1 Постановка задачи автоматизации управления эксплуатацией по текущему состоянию парка электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов посредством мониторинга их технического состояния и без исключения из эксплуатации</u>	39
<u>2.2 Структура аппаратно-программного комплекса диагностики электродвигателей постоянного тока стрелочных переводов</u>	41
<u>2.3 Выявление неисправностей в электродвигателе стрелочного перевода на основе анализа спектрального разложения его рабочего тока</u>	48
<u>2.3.1 Вычисление частотного спектра рабочего тока электродвигателя</u>	49
<u>2.3.2 Анализ гармоник частотного спектра рабочего тока электродвигателя стрелочного перевода</u>	51
<u>Выводы</u>	58
<u>РАЗДЕЛ 3 Совершенствование технической эксплуатации парков электродвигателей стрелочных переводов по текущему состоянию средствами интеллектуальных систем</u>	61
<u>3.1 Основные задачи повышения эффективности технической эксплуатации парков электродвигателей по текущему состоянию средствами интеллектуальных систем</u>	61
<u>3.2 Выявление неисправностей в электродвигателях постоянного тока методами искусственных нейронных сетей на основе опытных данных образцов двигателей с эталонными неисправностями</u>	64

<u>3.2.1 Выявление неисправностей в электродвигателях постоянного тока с использованием моделей искусственных нейронных сетей на основе дискретизации рабочего тока двигателя</u>	64
<u>3.2.1.1 Выбор и испытание архитектуры нейросети</u>	66
<u>3.2.1.2 Решение задачи классификации неисправностей электродвигателей в условиях эксплуатации на основе нейросетевой модели</u>	69
<u>3.2.2 Выявление неисправностей в электродвигателях постоянного тока на основе нейронно-сетевого моделирования данных спектрального разложения токов</u>	71
<u>3.2.2.1 Задача диагностирования неисправностей электродвигателей средствами нейронных сетей</u>	72
<u>3.2.2.2 Диагностирование неисправностей электродвигателей стрелочных переводов на основе нейронной сети многослойный персептрон</u>	75
<u>3.2.2.3 Диагностирование неисправностей средствами сети радиальная базисная функция</u>	77
<u>3.2.2.4 Диагностирование неисправностей средствами сети Кохонена</u>	78
<u>3.3 Диагностирование электродвигателей постоянного тока на основе нечетко-статистических моделей объектов</u>	80
<u>3.3.1 Выявление неисправностей в электродвигателях методами экспертных систем</u>	80
<u>3.3.2 Диагностирование состояний ЭД с использованием нечетких моделей</u>	85
<u>3.3.3 Задача выявления неисправностей в электродвигателях с использованием метода нечетко-статистического управления</u>	88
<u>3.3.4 Диагностирование ЭД по данным частотного спектра на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил</u>	91
<u>Выводы</u>	98
<u>РАЗДЕЛ 4 Разработка многоуровневой модели для управления эксплуатацией парка электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов по текущему состоянию</u>	100
<u>4.1 Проблема автоматизированного управления техническими системами парка электродвигателей «по текущему состоянию»</u>	100
<u>4.2 Разработка информационного обеспечения для автоматизации процессов эксплуатации парка электродвигателей на основе оценки их текущего состояния</u>	102
<u>4.3 Планирование процессов эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов на основе модели парка и индивидуальных моделей электродвигателей по текущему состоянию</u>	105
<u>4.4 Разработка двухуровневой нейронно-сетевого модели процессов эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов по текущему состоянию</u>	110
<u>Выводы</u>	116

<u>ВЫВОДЫ</u>	119
<u>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</u>	121
<u>ПРИЛОЖЕНИЯ</u>	137
<u>Приложение А. Акты лабораторных испытаний и приема-сдачи макетного образца аппаратно-программного комплекса диагностики стрелочных электродвигателей</u>	138
<u>Приложение Б. Оценка экономического эффекта внедрения аппаратно-программного комплекса диагностики электродвигателей постоянного тока стрелочных переводов</u>	140
<u>Приложение В. Программный модуль нечетко-статистической экспертной системы выявления неисправностей в электродвигателях постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов</u>	143
<u>Приложение Г. Спектрограммы электродвигателей постоянного тока с различными видами неисправностей</u>	152

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АПК	аппаратно-программный комплекс
АСУЭ	автоматизированная система управления эксплуатацией
АЦП	аналого-цифровой преобразователь
БНСП	база нечетко-статистических правил
БП	база правил
БПФ	быстрое преобразование Фурье
ИМД	индивидуальная модель двигателя
ИНС	искусственная нейронная сеть
ИС	интеллектуальная система
МП	модель парка
НСУ	нечетко-статистическое управление
ПЭД	парк электродвигателей
СП	стрелочный перевод
УЗ	Укрзализныця
ЭД	электродвигатель
ЭС	экспертная система
ЭТС	эксплуатация «по текущему состоянию»
ЭЦ	электрическая централизация
MLP	многослойный персептрон
PSP	постсинаптический потенциал
RBF	радиальная базисная функция
SOFM	сеть Кохонена

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Гарантия безопасности является одним из основных требований к железнодорожным перевозкам. Ответственными объектами системы железнодорожного транспорта являются стрелочные переводы (СП) с электродвигателями (ЭД) постоянного тока. В Укрзалізнице (УЗ) эксплуатируется свыше 30 тыс. ЭД, из них на Придніпровській залізничній дорозі – 8 тыс. Задача обеспечения безотказной работы, а также сокращения расходов на эксплуатацию и ремонт парков ЭД, является актуальной.

В настоящее время электродвигатели постоянного тока широко используются в промышленности и на железнодорожном транспорте, где обслуживание и ремонт ЭД стрелочных переводов выполняется по планово-предупредительному методу. При этом проводится исключение ЭД из эксплуатации, что требует значительных материальных и временных ресурсов. Ремонт и замена стрелочных приводов происходит согласно принятым в УЗ нормативам, что часто ведет к преждевременному капитальному ремонту двигателя с неиспользованным ресурсом. Для парков ЭД важной и все более актуальной задачей является переход к обслуживанию с учетом текущего технического состояния ЭД. Для автоматизированного решения этой задачи необходимо разработать эффективную технологию, соответствующие модели и методы, а также создать программно-технические средства для эксплуатации парков ЭД. При этом требуется обеспечить своевременную оценку фактического состояния двигателей, а в случае исчерпания технических ресурсов – указать на необходимость их замены, или определить очередность ремонтов ЭД в условиях ограниченных временных и других ресурсов.

Мониторинг и своевременная диагностика ЭД позволяют значительно сократить расходы на их эксплуатацию и ремонт. Выявление в условиях эксплуатации неисправностей задолго до полного отказа ЭД дает возможность повысить безопасность и снизить издержки, вызванные простоем и обслуживанием соответствующих приводов. В диссертации разработан метод и информационная технология автоматизированного мониторинга и диагностирования парка ЭД железнодорожных стрелочных приводов без их исключения из эксплуатации. Технология основана на формировании средствами интеллектуальных систем индивидуальных моделей процессов эксплуатации ЭД стрелочных переводов. За счет анализа рабочих токов ЭД технология позволяет выявлять больше неисправностей, чем применяемые в УЗ методы диагностирования, а также дает возможность определять скрытые неисправности двигателя задолго до его отказа.

Разработка современных методов и средств, обеспечивающих возможность эксплуатации парков ЭД на основе параметров их текущего состояния, является актуальной для железных дорог Украины.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с основными направлениями развития железнодорожного транспорта: «Стратегія розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року» (одобрено распоряжением Кабинета Министров Украины от 16 декабря 2009 г. № 1555-у). Выбранное направление исследований связано с выполнением следующих работ в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна:

- научно-исследовательская работа № ПР/НТО – 071423/НЮ 46.18.07.09 «Розробка експериментального програмно-апаратного комплексу з дистанційної діагностики електродвигунів постійного струму стрілочних переводів» от 11 июня 2007 г., № госрегистрации 0109U000482;
- научно-исследовательская работа «Організація системи ремонту локомотивів з урахуванням результатів діагностування», № госрегистрации 0105U001799;
- научно-исследовательская работа «Розробка адаптивних методів, інформаційних технологій та уніфікованих інформаційних процедур багатокритеріального ієрархічного і нечіткого управління в умовах невизначеності», номер госрегистрации 0109U002989).

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является повышение эффективности процессов эксплуатации парков электродвигателей постоянного тока железнодорожных СП с учетом параметров текущего технического состояния на основе использования методов интеллектуальных систем (ИС). Разработанные методики обеспечивают возможность обнаружения неисправностей задолго до полного отказа ЭД без их исключения из эксплуатации, что повышает безопасность стрелочных приводов, существенно снижает издержки, вызванные простоем приводов, значительно сокращает расходы на эксплуатацию и ремонт парков ЭД СП.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- усовершенствованы методы диагностирования электродвигателей постоянного тока без исключения их из эксплуатации, используя спектральный анализ рабочего тока двигателя и модели искусственных нейронных сетей;
- разработаны модели диагностирования ЭД СП, основанные на нечетко-статистической экспертной системе, что позволяет учитывать как экспертную, так и статистическую информацию о процессах эксплуатации ЭД;
- разработаны методы планирования процессов эксплуатации парков ЭД на основе индивидуальных моделей технических систем с использованием сетей Кохонена;
- разработаны многоуровневые модели процессов эксплуатации «по текущему состоянию» парков электродвигателей постоянного тока на основе индивидуальных моделей технических систем;

– разработана модель распределения ресурсов для решения задачи планирования процессов эксплуатации парков ЭД, которая учитывает текущее и спрогнозированное состояния технических систем, определяемые индивидуальными моделями объектов;

– разработано АРМ стационарного электромеханика для решения задачи автоматизированной диагностики электродвигателей постоянного тока в условиях рабочей нагрузки.

Объектом исследования диссертационной работы являются процессы эксплуатации парков электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных приводов.

Предмет исследований – мониторинг и эксплуатация парков электродвигателей постоянного тока стрелочных приводов на основе диагностики параметров текущего состояния без исключения двигателя из эксплуатации.

Методы исследований. Результаты диссертации получены с помощью системного анализа сложных объектов и процессов; методов мониторинга технического состояния электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов; методов спектрального анализа рабочего тока двигателей; методов диагностики и моделирования объектов на основе искусственных нейронных сетей; методов математической статистики и теории нечетких величин; методов экспертных систем; моделей нечетко-статистической классификации объектов; комплексных нейронно-нечетких и нейронно-сетевых моделей процессов эксплуатации парков технических объектов.

Мониторинг технического состояния электродвигателей реализован с помощью спектрального анализа на основе дискретизации рабочего тока двигателя и алгоритма быстрого преобразования Фурье. Модели искусственных нейронных сетей (на основе многослойных персептронов, радиальных базисных функций и сетей Кохонена) были использованы для выявления неисправностей в электродвигателях. Методы теории нечетких величин применялись для создания нечетких моделей диагностики состояний электродвигателей. Методы экспертных систем были использованы при создании экспертной системы диагностирования электродвигателей. Модель нечетко-статистической классификации объектов применялась для формирования базы нечетко-статистических правил диагностирования электродвигателей по данным частотного спектра рабочего тока двигателя. Двухуровневые нейронно-сетевые модели были использованы для создания модели парка электродвигателей на основе индивидуальных моделей одиночных ЭД и для прогнозирования технического состояния двигателей.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

В диссертации разработаны и развиты модели и методы интеллектуальных систем, предназначенные для автоматизированного решения комплекса задач совершенствования мониторинга, эффективного

планирования и управления эксплуатацией парков ЭД железнодорожных стрелочных переводов. При этом

впервые:

– решена задача диагностирования электродвигателей стрелочных переводов средствами нечетко-статистических экспертных систем, что позволяет учесть как экспертную, так и статистическую информацию о функционировании технических систем и повышает точность оценки их состояния без исключения из эксплуатации;

– для парка электродвигателей постоянного тока на основе нейронных сетей Кохонена разработана многоуровневая модель индивидуальных процессов их эксплуатации «по текущему состоянию», которая обеспечивает управление процессами мониторинга и планирования ремонтов двигателей;

– сформулирована задача выбора оптимальной очередности ремонтов для парка электродвигателей стрелочных переводов, которая учитывает текущие и ожидаемые состояния устройств, определенные по индивидуальным моделям процессов их эксплуатации;

усовершенствованы:

– модели диагностирования электродвигателей постоянного тока без их исключения из эксплуатации, за счет применения быстрого преобразования Фурье и искусственных нейронных сетей при спектральном анализе рабочего тока, что обеспечивает повышение точности диагностирования текущего состояния двигателей и прогнозирования возможных отказов стрелочных переводов.

Практическое значение полученных результатов определяется следующим:

– в диссертации получено новое решение задачи повышения эффективности процессов эксплуатации по техническому состоянию парков электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов;

– предложенные методики и разработанная технология дают возможность определять техническое состояние электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов без их извлечения из привода, задолго до их отказа;

– полученные в диссертации результаты и выводы использованы в научно-исследовательской работе «Розробка експериментального програмно-апаратного комплексу з дистанційної діагностики електродвигунів постійного струму стрілочних переводів» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, что выполнялась по заданию Укрзалізничці;

– применение разработанных в диссертации методов и средств позволило установить рациональные параметры и режимы диагностирования ЭД постоянного тока моделей ДП-0,18, ДП-0,25, МСП-0,15 и МСП-0,25;

– полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологий эксплуатации парков ЭД железнодорожных стрелочных переводов, а также их внедрения на полигоне железных дорог Украины.

Личный вклад соискателя. Все результаты теоретических и экспериментальных исследований, приведенные в работе, получены автором лично или непосредственно с его участием.

Личный вклад соискателя заключается в самостоятельном планировании и проведении исследований, обработке полученного материала, формулировке научных положений и выводов. В публикациях, написанных в соавторстве, автору принадлежит:

- разработка моделей и выбор архитектуры искусственной нейронной сети для решения задачи диагностирования электродвигателей [90];
- создание базы правил экспертной системы для диагностирования электродвигателей постоянного тока [72];
- проведение спектрального анализа рабочего тока электродвигателей и разработка нечетко-статистической базы знаний диагностики электродвигателей [34];
- разработка многоуровневой системы моделей для управления эксплуатацией парка и планирования очередности ремонтов электродвигателей стрелочных переводов [85].
- методика использования и разработка рекомендаций относительно подбора архитектуры искусственных нейронных сетей для решения задачи определения технического состояния локомотивов [14, 15];
- разработка моделей диагностики и управления развитием систем на основе рейтинговых оценок [88].

Работы [112, 107] написаны без соавторов.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертации докладывались, обсуждались и были одобрены на международных конференциях "Проблеми економіки транспорту" (2009, 2010 г., г. Днепропетровск); на международных конференциях "Сучасні інформаційні технології на транспорті, у промисловості й освіті" (2007–2012 г., г. Днепропетровск); на V Международной научно-практической конференции: «Проблемы экономики и управления на железнодорожном транспорте ЭКУЖТ 2010 (2010 г., г. Яремче); на научном семинаре кафедры Компьютерных информационных технологий ДИИТа (2007–2012 г., г. Днепропетровск).

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 18 научных трудах, в том числе 8 статей – в научных сборниках, которые входят в перечень специализированных изданий, 10 публикаций – в тезисах докладов международных конференций.

РАЗДЕЛ 1

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ТЕКУЩЕМУ СОСТОЯНИЮ ПАРКОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

1.1 Роль стрелочных электроприводов в обеспечении безопасности движения на железной дороге. Анализ данных статистики об отказах стрелок электрической централизации

Обслуживание сложных систем, к которым относятся и стрелочные электроприводы, предусматривает решение ряда вопросов, которые являются необходимыми для выработки наилучшего регламента профилактики. Статистически-вероятностный метод оценки надежности устройств основан на использовании статистических данных об отказах, которые были добыты из опыта эксплуатации систем ЭЦ.

Система ЭЦ имеет иерархическую структуру, то есть состоит из ряда подсистем [93]. На практике выбранный класс таких подсистем, на которых проводится обслуживание ЭЦ (стрелки, рельсовые цепи, источники электропитания и др.). При этом предусматривается, что подсистемы, выбранные как базовые элементы, в процессе обслуживания полностью обновляются. На процесс технического обслуживания оказывают влияние не только параметры надежности, но и соотношение расходов на диагностику и ремонт, наличие диспетчерского контроля за состоянием объектов и устройств.

При выборе базовых элементов принимают во внимание глубину обслуживания. В свою очередь, при известной, в нашем случае, глубине обслуживания задача заключается в поиске наилучших сроков (периодичности) проведения профилактики и оптимизации объема работ, которые выполняются.

Например, базовым элементом является электропривод стрелки. Он представляет собой функциональный элемент, который состоит из совокупности конструктивных элементов, которые выполняют отдельные логические функции. Эти элементы имеют свои конкретные показатели надежности, совокупность которых определяет надежность базового элемента.

Сбор информации был проведен на основании данных эксплуатации об отказах оборудования электрической централизации Приднепровской железной дороги, а также из [39, 40]. При этом были зафиксированы характер и причина отказов. Следует отметить, что полученная достоверность оценки надежности в условиях эксплуатации с учетом всего комплекса факторов, что оказывают влияние, является отличительной особенностью и преимуществом метода сбора и обработки статистической информации относительно отказов. Выполнена сравнительная характеристика потока отказов и его интенсивность в зависимости от

времени и объема выборки для основных базовых элементов ЭЦ [74]. Результаты обработки информации относительно отказов представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры отказов базовых элементов электрической централизации

Базовый элемент	Количество элементов, N	Число отказов на год			1/ч.	%
Стрелки с электроприводом	359	207	0,576	0,576	6,58	28,4
Рельсовые цепи	420	320	0,761	0,891	8,718	43,9
Светофоры	380	71	0,187	0,198	2,1	9,7
Другие элементы	359	131	0,365	0,364	4,16	18,0
Всего на 1 стрелку	1579	729		2,03		100

В табл. 1.1 использованы следующие обозначения:

- — интенсивность потока отказов, 1/ч.;
- — число отказов i -го базового элемента;
- — число отказов на условную базовую единицу;
- — число отказов базовой единицы по отношению к числу стрелок;
- — коэффициент отказов, который используется для выбора наиболее надежного элемента.

Из данных, приведенных в табл. 1.1 видно, что стрелки с электроприводом находятся на втором месте в ряду отказов базовых элементов после рельсовых цепей (28,4%). Средняя интенсивность отказов стрелок с электроприводом достигает $6,58 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Было установлено, что на крупных станциях этот параметр является существенно выше (приблизительно в 1,5 – 1,7 раз).

В табл. 1.2 представлены данные статистики о числе отказов стрелочных электроприводов на железных дорогах УЗ в 2011 и 2010 годах.

Таблица 1.2 – Число отказов стрелочных электроприводов (по службе Ш) на железных дорогах УЗ в 2011 и 2010 годах

	ДОН	ЛьВ	ОД	ПВ	П-3	ПРДН	ВСЬОГО
2011	13	5	5	3	7	7	40

2010	12	9	7	6	15	4	53
------	----	---	---	---	----	---	----

Стрелочные электродвигатели работают в тяжелых условиях внешнего влияния механических и климатических факторов. Согласно существующей Инструкции ЦШУ [35] замена электродвигателей всех типов выполняется не реже, чем один раз в восемь лет. При этом установлена дифференциация сроков замены, которая зависит от интенсивности динамических режимов работы электроприводов: стрелки, установленные по главному ходу, выполняют перевод в 1,5 раз чаще, чем стрелки, установленные на боковых колеях.

На железных дорогах Украины применяются электроприводы типов СП-ТС, СП-3М, СП-6, СПВ-6М. Новые типы ВСП-150 применяются относительно редко.

В стрелочных электроприводах СП-3, СП-3М по установленным нормативам ресурс составляет 10^5 переводов, СПВ-6М – $6 \cdot 10^5$ переводов. Количество переводов, которые выполняют стрелочные электроприводы, в среднем за 8 лет работы приведено в табл. 1.3.

Таблица 1.3 – Зависимость ресурса стрелочного электропривода от числа переводов стрелки

Тип стрелочного электропривода	Среднее число переводов за сутки	
	для выработки ресурса	при 20% запасе по остаточному ресурсу
СП-3, СП-3М	34	27
СП-6, СПВ-6М	204	163

Известно, что количество переводов стрелки за сутки зависит от места ее установки в горловине станции и от интенсивности поездной и маневровой работы. Анализ показывает, что на малых станциях с количеством стрелок до 30 единиц при интенсивности движения до 75 пар поездов за сутки только одна стрелка переводится до 40 раз за сутки, около половины стрелок не больше 5 раз за сутки, 18 % стрелок от 6 до 9 раз, 8% стрелок 12 раз и 5% стрелок 18 раз за сутки [71].

Следовательно, ресурс электроприводов тратится неравномерно. Если допустить, что расходы ресурса во времени определяются только количеством переводов стрелок и осуществляются равномерно, тогда динамика расхода ресурса может быть представлена кусочно-линейной функцией (рис. 1.1).

На основании несложных расчетов можно показать, что замена электродвигателей стрелок согласно периодичности, установленной Инструкцией ЦШУ [35], ведет к нежелательному преждевременному капитальному ремонту при неиспользованном ресурсе.

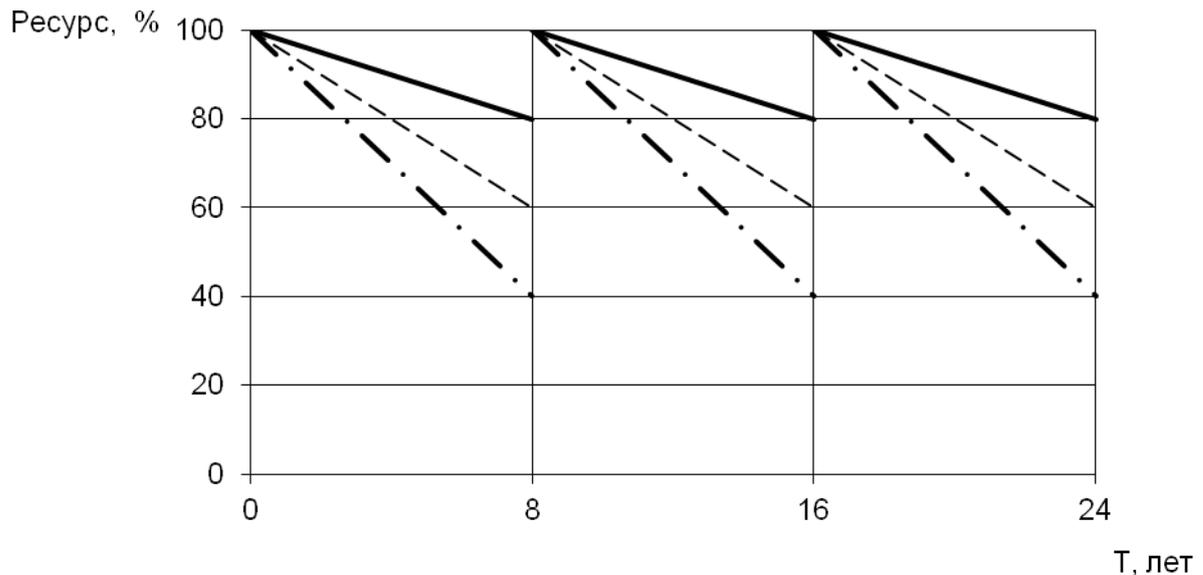


Рисунок 1.1 – Динамика расхода ресурса электроприводов СП-6М в зависимости от числа переводов за сутки

Используя данные, которые приведены на рис. 1.1, можно подсчитать через какое время надлежит выполнять замену электродвигателей стрелочных переводов при выработке их ресурса. К примеру, при числе переводов стрелок до 40 раз в сутки замену двигателей необходимо выполнять через 16-18 лет, до 80 переводов в сутки – через 10 лет.

Пересмотр периодичности замены двигателей стрелочных электроприводов в зависимости от интенсивности переводов на каждой отдельной промежуточной станции и места расположения стрелки в горловине крупной станции позволит более рационально использовать ресурс объекта до его капитального ремонта или списания. Это мероприятие является экономически выгодным и позволяет повысить надежность стрелочных электроприводов, даже если учитывать отказы, которые проявляются только при приработке стрелочного перевода.

Следует отметить, что в мире наметилась тенденция относительно внедрения систем дистанционного диагностирования и автоматизированных рабочих мест (АРМ) при обслуживании устройств СЦБ, что позволяет автоматизировать процесс контроля числа переводов стрелок и определить индивидуальный график замены электродвигателей стрелочных электроприводов.

Выполненный анализ отказов показывает, что доля отказов стрелок с электроприводом среди других базовых элементов электрической централизации достаточно велика. Усовершенствование методов диагностики и эксплуатации электродвигателей стрелочных переводов является актуальной задачей, которая направлена на уменьшение эксплуатационных расходов, увеличение надежности стрелок и повышение безопасности движения на железной дороге в целом.

1.2 Анализ причин отказов и возможностей диагностирования стрелочных электроприводов

На железных дорогах Украины эксплуатируется большое количество стрелочных переводов, которые работают в очень сложных условиях [96]. Все это влияет на характер дефектов и надежность их работы. Дефекты стрелочных переводов условно можно разделить на два вида: механические и электрические.

К первому виду относят дефекты, связанные с выкрашиванием металла головки остряка или шейки рамного рельса [61]. Кроме этого, могут проявляться дефекты элементов стрелочных гарнитур.

Дефекты второго вида связаны с отказами стрелочных электроприводов из-за потери контакта в автопереключателях, неисправности щеточно-коллекторных узлов электродвигателя и выхода из строя выпрямительного блока и др.

К характерным отказам электродвигателей постоянного тока относятся: загрязнение коллектора угольной пылью от щеток; снижение изоляции обмоток из-за присутствия пыли и влаги; выгорание изоляции между ламелями коллектора в результате некачественного их изготовления; неплотное притискивание щеток, которое ведет к их сдвигу относительно нейтрали; пробой изоляции коллектора в результате дефектов изоляции при изготовлении.

Все дефекты ведут к нарушению нормальной работы стрелочных переводов и, как следствие, к срыву графика движения поездов. Разработка средств технической диагностики стрелочных переводов приобретает еще большее значение в связи с увеличением скоростей движения поездов. В работе [119] рассмотрены причины схода с рельс скоростного пассажирского подвижного состава «Лондон - Глазго» на стрелочном переводе, оборудованном электроприводом, и оговорены мероприятия по профилактике и предупреждению таких случаев.

Существующие профилактические методы диагностики дефектных состояний стрелочных переводов не в полной мере обеспечивают требования эксплуатации систем централизации. Проведенный статистический анализ дефектов магистральных стрелочных переводов отражает состояние проблемы некоторых больших станций и сортировочных горок Приднепровской железной дороги. Оказалось, что при суточной пропускной способности 90-100 пар поездов средняя частота переводов стрелки ЭЦ составляет от 80 до 120, а на сортировочных горках – до 350.

Характер и количество отказов в стрелочных переводах за год первого вида представлены в табл. 1.4, а второго – в табл. 1.5.

Анализ причин отказов в стрелочных переводах показал, что по механическим дефектам на протяжении года выходит из строя каждая

шестая станционная стрелка, а на сортировочной горке – практически каждая вторая. В системах ЭЦ в среднем за год выходит из строя приблизительно каждый восьмой электропривод, в ГАЦ – каждый третий.

Таблица 1.4 – Анализ причин и количества отказов в стрелочных переводах из-за механических дефектов

№ п/п	Причина отказа	Количество отказов в системах, шт.	
		ЭЦ	ГАЦ
1	Упорные болты, что упираются в остряк	1	-
2	Отбой рамного рельса	-	1
3	Искривление остряка	1	1
4	Угон остряка	4	-
5	Накат металла головки рамного рельса	19	4
6	Увеличение и уменьшение ширины колеи остряков стрелки	11	5
7	Избыточное затягивание корневых болтов	5	2
8	Загрязнение (отсутствие) смазывания башмаков стрелки	10	2
9	Загрязнение стрелки	28	9
10	Прессование снега или грязи между остряком и рамным рельсом или в корневом креплении	46	8

Таблица 1.5 – Анализ причин и количества отказов в стрелочных переводах из-за электрических дефектов

№ п/п	Причина отказа	Количество отказов в системах, шт.	
		ЭЦ	ГАЦ
1	Слабое или (слишком сильное) ненормированное нажатие щеток коллектора	3	1
2	Медленное опрокидывание ножей (наличие усталости пружин автопереключателя)	7	2
3	Нестабильная работа фрикции	9	6
4	Излом колодок автопереключателя	18	-
5	Обрыв секций якорной обмотки или обмотки возбуждения	38	5
6	Потеря контроля положения стрелки под поездом (плохая регулировка контрольных тяг)	20	4

По результатам анализа причин отказов в стрелочных переводах, были разработаны и предложены способы и технические средства дистанционной непрерывной диагностики стрелочных переводов, в частности, способ диагностики переводов, что позволяет с высокой достоверностью обнаруживать следующие дефекты:

- люфт якорных подшипников и шарикоподшипников в подшипниковом узле;

- загрязнение или отсутствие смазывания башмаков стрелки [60].

Для диагностики переводов при использовании упомянутого способа получают в аналоговой форме ток, потребляемый электродвигателем. Далее с помощью аппаратных средств выполняют дискретный анализ формы кривой тока. Появление в спектре гармоник в диапазоне 10-150 Гц с амплитудой, которая изменяется, свидетельствует о наличии люфтов якорных шарикоподшипников и подшипников узла. Загрязнение (отсутствие) смазывания башмаков стрелки, упругость острижков проявляются при скачкообразном изменении скоростной частоты. Скоростная частота возникает в результате неодновременного закорачивания пластин коллектора щеткой в процессе вращения якоря, который вызывает изменение электрических параметров в параллельных областях обмотки якоря, а также является причиной возникновения частоты, пропорциональной скорости вращения последнего.

Также предложен способ диагностики электрических дефектов стрелочных электроприводов с двигателями постоянного тока [6]. Способ позволяет обнаруживать такие дефекты:

- обрывы и короткое замыкание секции якоря;
- распадание (обрыв) и короткое замыкание пластин коллектора;
- люфт и количество дефектных щеток электродвигателя;
- дефекты пусковых аппаратур;
- снижение уровня изоляции и сопротивления жил питающего кабеля.

При выявлении упомянутых выше дефектов также проводят анализ спектра кривой тока. С появлением в спектре определенных гармоник по их характеристикам делают выводы о неисправностях электрических параметров двигателя. Например, люфт щетки фиксируется по появлению в спектре гармоник скоростной частоты, а количество дефектных щеток определяется числом этих гармоник. Повреждения в обмотках, короткое замыкание (КЗ) якоря сопровождаются появлением в спектре гармоник кратной скоростной частоте. Обрывы в обмотке якоря вызывают скачкообразное изменение амплитуд гармоник.

Анализ данных статистики о причинах отказов железнодорожных стрелочных переводов показал, что значительная доля отказов приходится на электропривод. Неисправности в стрелочном электроприводе, а также многие неисправности, вызванные механическими дефектами стрелочного перевода, влияют на форму рабочего тока двигателя. Анализ спектральных характеристик тока ЭД позволяет увеличить количество диагностируемых неисправностей и повысить достоверность диагностики с возможностью прогнозирования отказов электродвигателей.

1.3 Применяемые методы эксплуатации электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов

Вопросы повышения эффективности эксплуатации ЭД СП были и остаются в центре внимания многих исследователей. Стрелочные переводы находятся на втором месте (после рельсовых цепей) в ряду отказов базовых элементов электрической централизации. В решение задачи диагностики железнодорожных стрелочных переводов значительный вклад внесли ученые: Бойник А. Б. [25], Гаврилюк В. И. [REF_Ref324350098 \h 19], Дмитренко И. Е. [REF_Ref324346863 \h 27, REF_Ref324346869 \h 28], Загарий Г. И. [25], Переборов А. С. [REF_Ref324872614 \h 64], Перникис Б. Д. [REF_Ref324347274 \h 65], Разгонов А. П. [72], Резников Ю. М. [75, REF_Ref324342318 \h 76], Чиликин М. Г. [REF_Ref324869623 \h 103], Ягудин Р. Ш. [REF_Ref324347274 \h 65]. Дальнейшее усовершенствование методов выявления неисправностей в электродвигателях железнодорожных стрелочных переводов стало возможным благодаря работам следующих ученых: Бальтет Л. И. [6], Грила А. И. [21], Маловичко В. В. [44 – REF_Ref322707390 \h 53], Парфенов В. И. [REF_Ref315446246 \h 60, REF_Ref315434492 \h 61], Руденко А. Б. [REF_Ref324848605 \h 78], Семьянских А. И. [REF_Ref314074298 \h 83], Унтеров С. Н. [98].

Решение проблем мониторинга, диагностирования и эксплуатации парка ЭД с учетом текущего состояния требует использования моделей интеллектуальных систем: искусственных нейронных сетей, нечетких и нечетко-статистических моделей, экспертных систем. Вклад в развитие моделей интеллектуальных систем внесли ученые: Дилигенский Н. В. [26], Заде Л. [11, 29-32], Рутковская Д. [REF_Ref290926253 \h 79], Скалзуб В. В. [89], Хайкин С. [101] и др.

Техническое обслуживание стрелок электрической централизации выполняется на УЗ по графику планово-предупредительных работ, согласно инструкциям ЦШ [69, 66]. Обслуживание выполняется электромехаником и электромонтером, которые проверяют состояние электропривода и стрелочной гарнитуры визуальным обзором. Ниже изложены используемые на УЗ методы и технологии эксплуатации стрелочных переводов [53, 97].

Люфты в шарнирных соединениях рабочих тяг проверяют, наблюдая за сдвигом скрепленных деталей относительно друг друга при переводе стрелки и отжиме остряка от рамного рельса. Люфты в узлах крепления контрольных тяг определяют принудительным их сдвигом относительно неподвижных частей. Болтовые соединения осматривают, плотность закрепления проверяют простукиванием молотком гаек, контргаек и стопорных пластин. Шпальный ящик также проверяют визуальным обзором. Визуально проверяют свободный перевод остряков стрелки из плюсового положения в минусовое и назад. Большим недостатком такой проверки является то, что все перечисленные проверки выполняются обслуживающим персоналом визуальным, без использования измерительных приборов, и, соответственно, точность измерения достаточно сомнительная. При визуальной проверке кроме возможных неточностей в

фиксации отказов и субъективности выводов об исправности и соответствии нормам того или другого узла необходимо учитывать и метод фиксации результатов. Результаты обзора электромеханик заносит в блокнот, а после проверки всех стрелок переносит записи в соответствующий журнал. При большом количестве стрелок, и ограниченном времени на проверку каждой стрелки, записи в блокноте делаются только по основным превышениям норм главных параметров, которые проверяются. Часть информации при этом теряется.

Проверку внутреннего состояния электропривода при переводе стрелки электромеханик выполняет вместе с электромонтером по согласию дежурного по станции. При такой методике проверки стрелочных электроприводов стрелку необходимо исключать из поездной работы на значительное время, так как полная проверка стрелочного электропривода занимает около 60 минут. Кроме этого, так как работы выполняются на колеях, то необходимо использовать для проверок два человека, что не рационально с экономической точки зрения.

Ток электродвигателей МСП и ДП измеряют при нормальном переводе стрелки и при работе на фрикцию. Эту работу совмещают с проверкой стрелок на плотность прижатия остриев стрелки. Ток нормального перевода стрелки определяют по максимальному отклонению стрелки амперметра. В зависимости от типа стрелочного перевода, марки крестовины, а также типа стрелочного электропривода и электродвигателя, норму тока для каждой стрелки определяют по нормативной документации [36].

К недостаткам существующего технического обслуживания можно отнести низкую точность результатов измерения, связанную с визуальной фиксацией результатов измерений, и необходимость регистрирования дополнительных факторов, которые влияют на результат проверки (такие как марка крестовины стрелки, тип двигателя, установленного на стрелке, и так далее). При использовании автоматизированной системы измерения такие проблемы не возникают.

Разница значений токов ЭД при работе электропривода на фрикцию при переводе стрелки в плюсовое и минусовое положение не должна превышать 10% среднего арифметического значения обоих токов. Напряжение на электродвигателе измеряют при переводе стрелки и при работе электропривода на фрикцию в свободное от движения поездов время по согласованию с дежурным по станции. Выполнения этой работы совмещают с измерением тока электродвигателя МСП (ДП) при нормальном переводе стрелки и работе электропривода на фрикцию.

Такая технология обслуживания имеет значительные затраты временных и человеческих ресурсов, и требует исключения стрелки на значительное время из поездной работы. Кроме этого измерения проводятся непосредственно на колеях, что связано с дополнительным риском для обслуживающего персонала. Для определения исправности стрелочного электродвигателя обслуживающим персоналом проверяется

состояние изоляции его обмоток от корпуса, сопротивление обмоток возбуждения и якоря, состояние коллектора и щеточного узла, а также целостность корпуса, муфты и выводов.

Недостатком существующего технического обслуживания и контроля состояния стрелочных двигателей является то, что для определения соответствия всех параметров заданным нормам необходимо иметь соответствующие навыки и знания, которые есть не у всего обслуживающего персонала. Также следует отметить, что точность результатов при таких измерениях достаточно невысока и позволяет выявить только явно выраженные неисправности [53].

В работе предлагается технология эксплуатации электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов, которая не требует извлечения двигателя из привода и позволяет выполнять дистанционную диагностику. Технология позволяет исправить многие недостатки используемых на УЗ классических методик обслуживания стрелок электрической централизации:

- повысить точность измеряемых параметров;
- уменьшить время нахождения обслуживающего персонала в области повышенной опасности на железнодорожных путях;
- автоматизировать процесс диагностики ЭД;
- снизить требования к квалификации обслуживающего персонала;
- автоматизировать ведение журналов;
- снизить время проверки состояния стрелок электрической централизации.

1.4 Существующие технологии и методы диагностирования стрелочных электроприводов

Анализ показывает, что существующие методы, а также системы контроля и диагностики электроприводов стрелок электрической централизации не позволяют выявлять множество неисправностей электродвигателей [12, 18, 25, 80, 81]. Статистика показала, что доля отказов электроприводов из общего числа отказов ЭЦ составляет около 28%. В свою очередь, доля отказов в электродвигателях постоянного тока стрелочных электроприводов составляет от 19 до 25 % [5]. Большую долю отказов имеет только автопереключатель, который, в отличие от электродвигателя, достаточно полно проверяется электромехаником при плановых диагностических работах [92].

Снижение доли отказов стрелочных электроприводов может быть достигнуто путем внедрения дистанционной технической диагностики электродвигателей постоянного тока стрелочных электроприводов, что и является одной из целей данной работы.

В работах [6, 83] рассматривается метод дистанционного определения неисправностей и осциллографический метод оценки состояния

стрелочного электродвигателя. При этом якорь электродвигателя, который проверяется, приводится в движение от отдельного электродвигателя с частотой вращения 300 - 500 об/мин. При этом электродвигатель, который проверяется, работает в режиме генератора. Электродвижущая сила, которая возникает в генераторе, подается на трансформатор, а дальше - на вход осциллографа. После анализа полученных осциллограмм можно оценить состояние электродвигателя.

Анализ схемных решений и методов поиска и оценки неисправностей ЭД показали, что практически все из них имеют недостатки, главным образом связанные со сложностью реализации схем технической диагностики, нуждаются в извлечении электрического двигателя из привода и, что самое главное, отличаются большими погрешностями при оценке параметров электрического двигателя.

В работе [21] предлагается выполнять диагностирование состояния стрелочного привода по осциллограмме проверки электродвигателя. Изображение осциллограммы тока исправного электродвигателя (рис. 1.2) содержит характерные острые всплески (1, 2, 3) и прямую линию (а – б).

Длительность спада импульсов составляет приблизительно $\frac{T}{2}$, а длина прямой линии $\frac{T}{2}$, где T – период следования импульса. Изображение может содержать и другие побочные кривые меньшей яркости.

Рисунок 1.2 – Осциллограмма тока исправного электродвигателя

Осциллограмма тока электродвигателя постоянного тока, который имеет межвитковое замыкание обмоток якоря, представлена на рис. 1.3 [21]. Изображение имеет характерное синусоидальное очерчивание с острыми всплесками. Период следования импульса равняется T . Осциллограмма стендовой проверки электродвигателя, который имеет обрыв обмотки одной секции якоря, показана на рис. 1.4 [21]. Изображение содержит характерные острые всплески (1, 2, 3) и вертикальные прямые. Вертикальные прямые отображаются с меньшей яркостью.

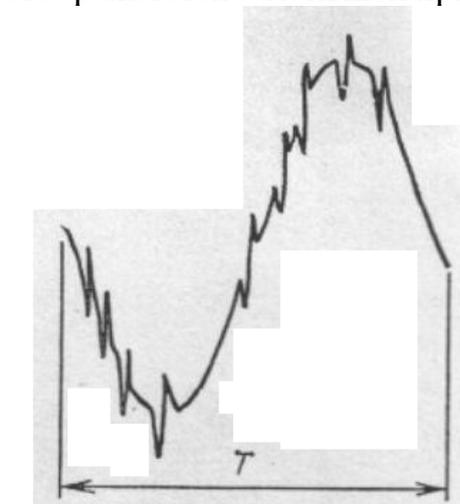


Рисунок 1.3 – Осциллограмма проверки электродвигателя с межвитковым замыканием обмоток якоря

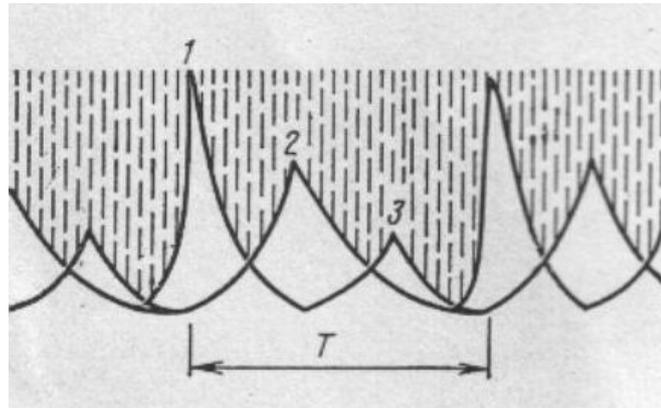


Рисунок 1.4 – Осциллограмма проверки электродвигателя с обрывом обмотки одной секции якоря

На рис. 1.5 дана осциллограмма стендовой проверки электродвигателя, который имеет обрыв обмоток нескольких секций якоря [21]. Изображение представляет собой характерный импульс трапецеидальной формы. Изображение может содержать посторонние кривые меньшей яркости.

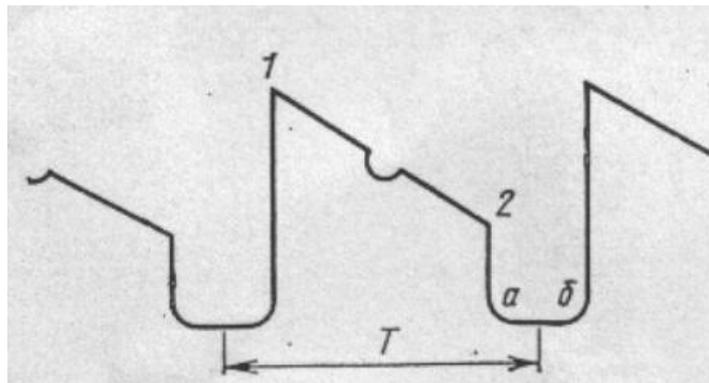


Рисунок 1.5 – Осциллограмма электродвигателя, который имеет обрыв обмоток нескольких секций якоря

В работах [1, 60, 61, 83, 98] предложены более эффективные методы технической диагностики ЭД. Эти методы позволяют контролировать как механические, так и электрические параметры электродвигателей и стрелочных переводов. При этом в схему питания стрелочного перевода постоянно включают датчик тока, из которого в непрерывном режиме выделяют и анализируют кривую потребляемого тока. При наличии в спектре тока гармоник в диапазоне от 20 до 10000 Гц по их характеристиками делают вывод о дефектах электрических составляющих электродвигателя стрелочного перевода. Например, повреждения в обмотке якоря фиксируют по наличию в спектре гармоники кратной скоростной частоте, а количество повреждений – по количеству превышений частот этих гармоник; обрывы в обмотке якоря фиксируют по скачкообразному изменению амплитуды гармоники, а короткое замыкание

в обмотке якоря – по наличию в спектре изменений амплитуды основной частоты.

При диагностике состояния механической части стрелочного перевода из датчика тока, постоянно включенного в схему питания электропривода, выделяют, осциллографируют и анализируют переменную составляющую кривой тока. При появлении в спектре гармоник в диапазоне от 1 до 1000 Гц по их характеристиками делают вывод о состоянии механической части перевода. Такое диагностирование позволяет обнаружить дефекты шарикоподшипников при появлении в спектре потребляемого тока гармоники частотой от 10 до 150 Гц. «Упругость остряка» стрелочного перевода и загрязнения башмаков фиксируют по скачкообразному изменению скоростной частоты. Люфт щеток электродвигателя фиксируют по появлению повышенных гармоник, а количество дефектных щеток – по числу этих гармоник.

Таким образом, реализация этих методов позволяет существенно повысить эффективность технической диагностики электрического двигателя постоянного тока стрелочных электроприводов за счет следующих элементов:

- увеличение глубины диагностирования объекта исследования (повышение объема информации о состоянии стрелочного перевода);
- повышение точности оценки параметров неисправности электроприводов постоянного тока;
- ускорение проведения диагностирования и прогнозирования неисправности объекта в условиях эксплуатации;
- изменение структуры и технологии профилактических работ, которые связаны со снижением эксплуатационных расходов.

Возможность проверять состояние стрелочного двигателя постоянного тока и частично состояние стрелочного перевода с помощью анализа кривой тока перевода стрелки рассматривалась и ранее [53, 76, 95]. При этом утверждалось, что измерения тока приборами визуального отсчета дает не достаточно точные результаты, вследствие кратковременных процессов и инерционности приборов. Более точные измерения можно провести с использованием шлейфового осциллографа, который включают в один из линейных проводников Л1 или Л2. В линейные проводники двигателя подключают реостат, с помощью которого можно установить различное эквивалентное сопротивление. По зафиксированным осциллограммам определяют уровень пускового и рабочего тока, а также время перевода стрелки.

Для дистанционного обнаружения неисправностей в стрелочном двигателе постоянного тока можно использовать переходное устройство [76]. Устройство состоит из реле типа АСШ-200 без выпрямителя, делителя напряжения, резистора гашения, нагрузочного резистора, контрольного амперметра и пусковой кнопки. Недостатками данного метода является необходимость использования дополнительной единицы обслуживающего персонала при проверке стрелок на плотность прилегания остряка, малое

количество выявляемых отказов стрелочного двигателя и стрелочного перевода, низкий класс точности полученных результатов, так как осциллограммы оцениваются и классифицируются визуально в реальном масштабе времени.

Более рационально фиксировать отказы стрелочного двигателя и стрелочного перевода не при работе двигателя стрелки в режиме генератора, а при рабочем переводе стрелки. Такой метод использовался на дистанциях сигнализации, централизации и блокировки № 5 и № 6 Приднепровской железной дороги [78]. Автором данного способа дистанционной диагностики электродвигателей типа МСП предложено в качестве датчика шунт, включенный в разрыв линейной цепи вместо рабочего предохранителя. С датчика снимаются два сигнала: ток нагрузки и переменные составляющие тока. Оба сигнала усиливаются и одновременно записываются на ленту быстродействующего кардиографа Н-338. Скорость движения ленты – 50 мм/сек. Сигнал рабочего тока нагрузки отражает состояние механической части стрелочного перевода, а переменные составляющие тока отражают состояние стрелочного электродвигателя. По ленте кардиографа определяют следующие отказы: стрелочный перевод требует регулирования, в двигателе имеются обрывы секций обмоток якоря, короткое замыкание в якоре, загрязнения коллектора и щеток, упругость остряка. Недостатками такого способа является необходимость исключить стрелку с поездной работы для проведения измерений, низкая точность результатов, так как система не защищена от воздействия помех и результаты измерений обрабатываются визуальным осмотром осциллограмм на ленте, а также низким количеством (всего 5 отказов) неисправностей, которые фиксируются данным методом.

В Юдинской дистанции сигнализации централизации и блокировки Горьковской железной дороги Российской Федерации проходит опытную эксплуатацию автоматизированная система измерения и контроля параметров электродвигателя постоянного тока стрелочных электроприводов [3]. Общий принцип работы данной системы заключается в регистрации тока, потребляемого электродвигателем во время рабочего перевода стрелки, превращение его в цифровую форму и передачу полученного массива данных для обработки в микроконтроллер. В разработанном варианте система состоит из датчика коммутационных пульсаций и датчика Холла. Информационный сигнал со вторичной обмотки трансформатора поступает на блок измерительного преобразования в канал измерений. Датчик Холла устанавливают непосредственно у предохранителей на токоведущих проводниках цепей питания стрелок. В данной системе контроль состояния стрелочных двигателей производится визуальным, пороговым, и спектральными методами. При использовании визуального анализа кривая потребления стрелки записывается в электронном виде и просматривается механиком службы сигнализации и связи, который идентифицирует неисправности,

опираясь на свой опыт. Пороговый анализ основан на определении соотношений между пиковыми значениями пульсаций тока, потребляемого стрелочным двигателем, и его выпрямленным значением. Было выбрано три пороговых уровня, характерных для определенных неисправностей. При превышении сигналом пороговых уровней, микроконтроллер выдает сообщение о неисправности, и требует обратить внимание на состояние стрелочного двигателя. Режим порогового анализа автоматический, он не требует непосредственного присутствия электромеханика. При обнаружении на экране монитора сообщения о неисправности стрелки, электромеханик может использовать визуальный анализ или более точный спектральный анализ. Спектральный анализ основан на алгоритме быстрого преобразования Фурье. По спектральному составу тока, определяется наличие таких неисправностей как обрыв обмоток якоря, плохая пайка, межвитковые замыкания, замыкания коллекторных пластин, искрение. Практически проверка одного двигателя методом визуального анализа составляет 15с, а методом спектрального анализа около 1 минуты. Автоматизированная система контроля представляет собой универсальный диагностический комплекс, который может использоваться как отдельное средство обеспечения безопасности движения поездов, так и в составе более сложных систем.

Предложенная система имеет ряд значительных недостатков при использовании ее для диагностирования стрелок электрической централизации. Во-первых, ток стрелочного двигателя перед оцифровкой снимается с катушки трансформатора, т. е. оцифровывается и анализируется только переменная составляющая тока. Это дает возможность контролировать и диагностировать состояние стрелочного двигателя, но полностью исключает возможность контроля и диагностирования стрелочного перевода. Во-вторых, решение о неисправности принимается электромехаником, то есть влияние человеческого, субъективного фактора не исключено. В-третьих, для проверки состояния стрелочного двигателя на станции все равно необходимо затрачивать время обслуживающего персонала, нет возможности выявлять неисправности в автоматическом режиме.

Изобретение [60] является способом дистанционного диагностирования стрелочного перевода с двигателями постоянного тока. Этот способ предусматривает осциллографирование кривой рабочего тока двигателя. По спадам и подъемам тока определяются дефекты подшипников, а по повышению амплитуды в конце перевода – пружинность остряков. Недостатками данного устройства является не достаточно высокая точность измерений контрольных параметров и невозможность прогнозирования развития отказов (информация об отказе появляется на блоке индикации только при превышении заданного порогового уровня). Также к недостаткам следует отнести малое количество контролируемых параметров, которые не в полной мере позволяют контролировать состояние стрелочного перевода. Данное

устройство построено на достаточно большом количестве различных электронных блоков и элементов и для правильного функционирования требует достаточно большого количества опорных уровней напряжений и источников питания, что негативно влияет на надежность его работы.

Также известен способ дистанционной диагностики состояния механической части стрелочного перевода с электроприводом постоянного тока [61]. Суть данного способа заключается в том, что выделяют оциллограмму и анализируют кривую составляющую потребляемого тока двигателя. Согласно полезной модели проводят мгновенный анализ кривой тока, например, с помощью быстрого разложения в ряд Фурье. При появлении в спектре гармоник в диапазоне 1-10000 Гц по их частоте, амплитуде и параметрам скоростной частоты делают заключение о состоянии механической части стрелочного перевода. Дефекты шарикоподшипников фиксируют при появлении в спектре составляющей кривой потребляемого тока дополнительной гармоники с частотой от 10 до 150 Гц, пружинистость острия стрелочного перевода и загрязнения подушек фиксируют по скачкообразному изменению скоростной частоты; люфт щеток электродвигателя фиксируют по появлению повышенных гармоник скоростной частоты, а количество дефектных щеток – по числу этих гармоник. Недостатками этого способа являются: невозможность прогнозирования возникновения отказов, так как проводится мгновенный анализ; малое количество выявляемых отказов; отсутствие контроля уровня постоянной составляющей, что сужает возможности диагностирования.

Выводы

Анализ статистических данных относительно отказов стрелочных электроприводов постоянного тока и переводов позволил выявить ряд существенных параметров отказов. В частности, интенсивность потока отказов стрелочных электроприводов находится в пределах

. По статистическим данным об отказах стрелочных электроприводов выявлена необходимость относительно увеличения количества диагностируемых неисправностей и повышения достоверности диагностики с возможностью прогнозирования отказов электродвигателей.

По причине неравномерного расхода ресурсов электродвигателей стрелочных переводов замена электродвигателей стрелок согласно периодичности, установленной принятыми на Укрзализныци нормативами, ведет к нежелательному преждевременному капитальному ремонту двигателя с неиспользованным ресурсом.

Выполнен обзор существующих методов технической диагностики электродвигателей постоянного тока стрелочных электроприводов. Были обнаружены наиболее эффективные методы, а именно метод, который предусматривает определение состояния электродвигателя и неисправностей по кривой рабочего тока с использованием спектрального

анализа на основе быстрого преобразования Фурье.

В настоящее время на полигоне железных дорог Украины используются следующие методы диагностики ЭД стрелочных приводов: омметра, мегомметра, трансформатора, импульсный и метод осциллографа-самописца.

Существующие статические методы диагностики ЭД (омметра, мегомметра, трансформатора, импульсный) производят измерения на выключенном двигателе, что не позволяет определить многие неисправности, проявляемые только при номинальной рабочей нагрузке. Рабочий ток двигателя также может исследоваться методом осциллографа-самописца, однако этот метод имеет низкую разрешающую способность и требует высококвалифицированного расшифровщика. Многолетняя практика показывает, что методы диагностики, используемые сегодня на практике, не выявляют многих неисправностей электродвигателей.

Материалы раздела опубликованы в работах [72, 74, 85, 87].

РАЗДЕЛ 2

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ПО ТЕКУЩЕМУ СОСТОЯНИЮ ПАРКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

2.1 Постановка задачи автоматизации управления эксплуатацией по текущему состоянию парка электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов посредством мониторинга их технического состояния и без исключения из эксплуатации

Под неисправностью электродвигателя будем понимать нарушение нормальной работы одной из его деталей. Примерами неисправностей электродвигателя являются: обрыв секции якоря, короткое замыкание обмотки, короткое замыкание пластин коллектора, круговой огонь по коллектору и т.д. Ротор двигателя может продолжать вращаться при наличии в нем неисправности. Чем дольше электродвигатель работает с неисправностью, тем больше новых неисправностей в нем возникает. Чем больше количество неисправностей в двигателе, тем дороже обойдется его ремонт. Неисправности в электродвигателе приводят к его неработоспособности. Работа двигателя с неисправностями может привести к прекращению вращения ротора, т.е. к отказу.

Своевременная диагностика неисправностей – одна из важных технико-экономических проблем при эксплуатации электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов. Отказавший электродвигатель нуждается в замене или капитальном ремонте. Стоимость капитального ремонта сравнима со стоимостью нового двигателя. Стоимость текущего или среднего ремонта в 4 – 6 раз дешевле стоимости нового электродвигателя. Целью предлагаемого метода диагностики является раннее выявление неисправностей электродвигателя в ходе его эксплуатации, что позволяет предотвратить выход из строя и восстанавливать двигатель с меньшими затратами, а также повысить надежность использующих электродвигатели приводов. Выявление неисправности задолго до полного отказа двигателя дает возможность повысить безопасность использующих электродвигатели приводов, а также существенно снизить издержки, вызванные их простоем.

После изучения работ [1, 21, 60–63, 83, 98] было принято решение определять состояние ЭД постоянного тока стрелочного перевода по форме кривой тока, потребляемого двигателем в процессе эксплуатации. Спектральный анализ позволяет представить рабочий ток двигателя в виде множества гармонических составляющих. Каждая гармоника тока имеет определенную частоту и амплитуду. Вид неисправности электродвигателя оценивается на основе анализа гармонических

составляющих. Это дает возможность выявлять многие неисправности стрелочного перевода: обрыв и короткое замыкание в обмотке электродвигателя, неисправности в шарикоподшипниковом механизме («битье подшипника»), люфт щеток электродвигателя и дефекты в них, «упругость остряка», загрязнения башмаков стрелки и другие.

В работе предложен метод и информационная технология автоматизированной диагностики электродвигателей постоянного тока. ЭД постоянного тока нашли широкое применение в промышленности и на транспорте. Работоспособность предлагаемого метода диагностики была подтверждена при выявлении неисправностей в электродвигателях постоянного тока железнодорожных стрелочных приводов моделей ДП-0, 18, ДП-0,25, МСП-0,15 и МСП-0,25. Разработанная система автоматизированной диагностики позволяет ежегодно выявлять неисправности у 12% эксплуатируемых двигателей стрелочных приводов. Согласно экспертным оценкам обнаружение неисправностей происходит в среднем за 6 месяцев до отказа электродвигателя.

Предлагаемый метод диагностики определяет неисправности двигателя в режиме его рабочей нагрузки [106]. Диагностика электродвигателя может проводиться на стенде во время планового осмотра. Вместе с этим для электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов возможен мониторинг их технического состояния и без извлечения из стрелочного привода. Для этого кабеля, питающие стрелочные двигатели, сводятся в релейную. При снятии кривой тока электродвигателя в релейной возможен постоянный контроль технического состояния всех стрелочных электродвигателей на станции.

Предлагаемые средства автоматизации процессов диагностики ЭД основаны на анализе частотного спектра тока двигателя и позволяют выявлять и оповещать персонал о появлении определенных видов неисправности в двигателе в ходе его эксплуатации. Разработанный и испытанный макет устройства технической диагностики позволяет при его внедрении повысить надежность эксплуатации стрелочных переводов и безопасность движения поездов за счет своевременного предотвращения возникновения неисправностей.

2.2 Структура аппаратно-программного комплекса диагностики электродвигателей постоянного тока стрелочных переводов

Предлагаемые в работе методы эксплуатации по текущему состоянию парков электродвигателей стрелочных переводов средствами интеллектуальных систем были апробированы при разработке аппаратно-программного комплекса диагностики электродвигателей постоянного тока стрелочных переводов [74, 108].

Общая схема разработанной автоматизированной системы управления эксплуатацией (АСУЭ) парка электродвигателей (ПЭД) представлена на

рис. 2.1. Здесь показано, что кабели, питающие стрелочные двигатели, сводятся в релейную. В релейной при снятии кривой тока электродвигателей реализуется постоянный контроль технического состояния всех стрелочных электродвигателей на станции без исключения ЭД из процесса эксплуатации.

Рисунок 2.1 – Схема автоматизированной системы управления эксплуатацией парка электродвигателей стрелочных переводов

Автоматизированная технология основана на анализе частотного спектра рабочего тока двигателя. Дискретизация тока электродвигателя реализуется в блоке аналого-цифрового преобразователя (АЦП), получение спектральных характеристик тока ЭД реализовано с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Входными данными модуля мониторинга ЭД является частотный спектр тока, рассчитанный в блоке БПФ (рис. 2.1). Для каждого электродвигателя формируется индивидуальная модель (ИМ), которая хранит в том числе и спектральные характеристики исправного состояния двигателя. Модуль мониторинга сравнивает спектр, полученный из блока БПФ, со спектром исправного состояния из соответствующей ИМ ЭД. При обнаружении существенных различий спектров модуль мониторинга передает спектральные характеристики анализируемого ЭД в модуль диагностирования. На выходе модуля диагностирования получают оценки достоверностей выявляемых неисправностей электродвигателя. Эти оценки сохраняются в ИМ ЭД, формируя временной ряд, который используется для прогнозирования технического состояния электродвигателя. Текущее и спрогнозированное техническое состояние каждого ЭД из модуля диагностирования передается в модуль очередности ремонта электродвигателей, который рассчитывает рекомендации о порядке ремонта ЭД.

При использовании двухпроводной схемы управления стрелкой (рис. 2.2) [41] два провода Л1 и Л2 используются для перевода стрелки и контроля ее положения, так как перевод стрелки осуществляется постоянным током, а контроль – переменным [37, 84]. При снятии кривой тока ЭД в цепи Л1, Л2 реализуется мониторинг технического состояния всех стрелочных электродвигателей на станции без исключения ЭД из процесса эксплуатации.

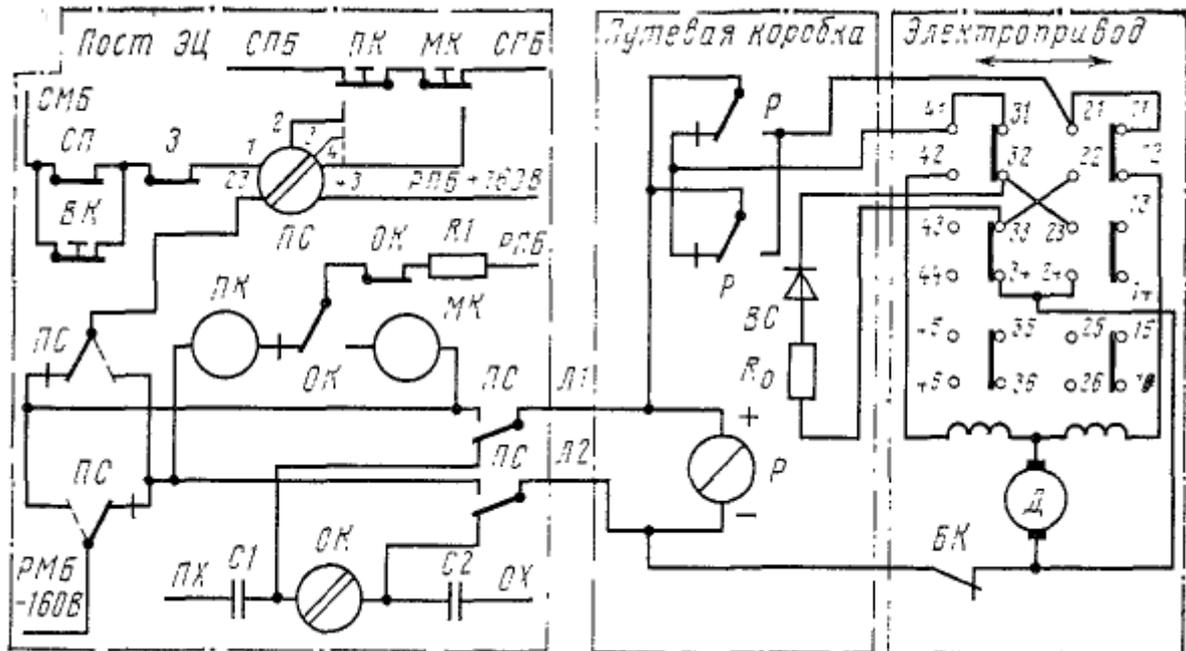


Рисунок 2.2 – Двухпроводная схема управления стрелкой

Разработанная АСУЭ ПЭД производит измерения характеристик двигателя, находящегося под воздействием номинальных, рабочих значений напряжения, тока, магнитного поля и центробежных сил [10]. Это позволяет выявлять больше неисправностей, чем при использовании статических методов диагностики, и делает возможным замену электродвигателя до его полного выхода из строя. Разработанные модели диагностирования могут быть автоматически настроены на выявление новых видов неисправностей. Для этого необходимо задать эталоны тока двигателей с неисправностями. Существенно, что применение АСУЭ ПЭД не требует высококвалифицированного инженера электромеханика как для настройки, так и для эксплуатации.

При разработке системы управления эксплуатацией парка электродвигателей стрелочных переводов были реализованы следующие требования:

- прогнозирование процесса развития неисправностей электродвигателей за 3–5 месяцев до полного отказа двигателя;
- выявление неисправностей электродвигателей, которые изымаются благодаря профилактике согласно Инструкции ЦШЕОТ-0012-98, должно быть осуществлено с достоверностью не менее 0,9; при этом предусматривается, что относительный уровень значения прогнозирования параметра не больше, чем 0,2 от его предельной величины при отказе (параметр прогнозирования устанавливается предварительно на основании экспериментальных исследований);
- устройство согласования АСУЭ ПЭД и схемы управления стрелкой должно быть выполнено без отключений монтажных проводов в точках подключения предохранителей;

- устройство согласования комплекса не должно влиять на токовые режимы контрольных и рабочих кругов схемы управления стрелкой;
- в АСУЭ ПЭД необходимо реализовать поиск неисправностей с отображением результатов на мониторе компьютера и указанием состояния объекта, характера неисправности, величины параметра прогнозирования, номера объекта контроля;
- информация о параметрах объектов, полученная в процессе диагностики, должна сохраняться в базе данных дистанции Сигнализации и связи или РТД, и, при необходимости, быть использована экспертами для анализа;
- периодичность профилактики ЭД может быть установлена по состоянию объекта, которое определяется АСУЭ ПЭД, в отличие от периодичности, которая устанавливается по графику планово-предупредительных работ согласно существующей технологии технического обслуживания и ремонта.

Диагностика ЭД может проводиться на стенде во время планового осмотра. Структурная схема разработанного и изготовленного макетного образца аппаратно-программного комплекса для диагностирования состояния электродвигателей постоянного тока стрелочных переводов на стенде представлена на рис. 2.3 [74]. В состав комплекса входят: двигатель, который подлежит диагностированию; устройство для согласования рабочих цепей электродвигателя с аппаратно-программным комплексом; блок превращения аналогового сигнала в цифровой; персональная электронная вычислительная машина; печатающее устройство.

Рисунок 2.3 – Структурная схема макетного образца для диагностирования электродвигателей постоянного тока стрелочных переводов на стенде при плановом осмотре

Диагностирование осуществляется посредством анализа рабочего тока электродвигателя стрелочного электропривода. Ток передается через устройство согласования и аналого-цифровой преобразователь к персональному компьютеру. После введения сигнала в компьютер, с помощью специально разработанного программного обеспечения осуществляется его спектральный анализ методом быстрого преобразования Фурье и определяется состояние двигателя. Результаты диагностирования выводятся на печатающее устройство, которое дает возможность оценить параметры двигателя, указывающие на наличие или отсутствие неисправностей в нем. Макетный образец аппаратно-программного комплекса был испытан в условиях ремонтно-технологического участка дистанции Сигнализации и связи № 6 Приднепровской железной дороги.

Подключение устройства согласования АПК к схеме управления стрелкой представлено на рис. 2.4. Подключение осуществляется через блок гальванической развязки, реализованный с помощью трансформатора

(рис. 2.4).

Рисунок 2.4 – Схема испытания аппаратно-программного комплекса диагностирования электродвигателя постоянного тока стрелочного электропривода с использованием в качестве устройства согласования трансформатора

Испытуемый электродвигатель подключают к аппаратно-программному комплексу по схеме (рис. 2.4), где $R_{ш}$ сопротивление шунта в рабочей цепи электродвигателя, величина которого нормируется;

C распределительный конденсатор; $I_{р}$ рабочий ток двигателя постоянного тока; Tr распределительный трансформатор с коэффициентом трансформации k ; $Я$ якорь электродвигателя; $C1$, $C2$ первая и вторая секции обмотки статора соответственно [60, 61].

Переменные гармонические составляющие рабочего тока электродвигателя конвертируются в напряжение благодаря шунту $R_{ш}$ и поступают на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) через трансформаторный блок. АЦП выполняет преобразование сигнала из аналоговой формы в цифровую с целью выполнения спектрального анализа и последующей обработки [24, 91]. По характерным частотам спектра, которые рождаются вследствие той или иной неисправности, осуществляется прогноз и диагностика объекта.

Коротко опишем порядок функционирования аппаратно-программного комплекса:

- в процессе испытания электродвигатель должен находиться в номинальном режиме работы;
- при выполнении испытаний с помощью аппаратно-программного комплекса в ремонтно-технологическом участке электродвигатель постоянного тока устанавливается на стенд, на него подается номинальное напряжение, а на валу устанавливают нагрузку близкую к номинальной с помощью мотор-генераторной установки;
- диагностирование осуществляется посредством анализа рабочего тока электродвигателя; согласно этому сигнал, который пропорционален току якоря двигателя, работающего при установившейся нагрузке, передается с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса к персональному компьютеру;
- сигнал, переданный к компьютеру, поддается спектральному анализу, по результатам которого определяется состояние электродвигателя; результаты проверки выводятся на экран компьютера или на принтер;
- результаты измерения основных параметров двигателя добавляются в базу данных; это дает возможность вести наблюдение за изменением параметров электродвигателя в течение всего срока эксплуатации и в

дальнейшем перейти к профилактическому ремонту по состоянию.

Аппаратно-программный комплекс может быть выполнен в двух вариантах: стационарном и мобильном. Стационарный вариант комплекса используется в условиях эксплуатации систем крупных станций и узлов. Мобильный вариант АПК реализуется с использованием ноутбука и предназначен для контроля объектов промежуточных станций железной дороги.

Испытание макета аппаратно-программного комплекса было выполнено в ремонтно-технологическом участке дистанции сигнализации и связи и в условиях эксплуатации существующей системы электрической централизации Приднепровской железной дороги согласно разработанному программному обеспечению и методике.

Акты лабораторных испытаний и приема-сдачи макетного образца аппаратно-программного комплекса диагностики стрелочных электродвигателей приведены в приложении А.

2.3 Выявление неисправностей в электродвигателе стрелочного перевода на основе анализа спектрального разложения его рабочего тока

Предлагаемая технология эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов и разработанный аппаратно-программный комплекс дистанционного диагностирования коллекторных ЭД постоянного тока позволяют выявлять следующие виды неисправностей [60, 61, 74]:

- обрыв секций якоря;
- короткое замыкание секций якоря;
- распайка коллектора;
- короткое замыкание пластин коллектора;
- зависание щетки;
- подбивание щетки;
- люфт щетки;
- нарушение коммутации;
- короткое замыкание обмотки возбуждения;
- пробой коллектора;
- предрасположенность к пробую коллектора;
- нарушение в работе пусковой аппаратуры;
- снижение уровня изоляции между жилами питающего кабеля;
- снижение уровня изоляции по отношению к земле;
- выход из строя выпрямительной установки;
- люфт якорных шарикоподшипников или люфт шарикоподшипников в подшипниковом щите;
- определение качества механической части стрелочного перевода;
- определение пружинности остряка.

Перечисленные виды неисправностей выявляются на самой ранней стадии, не доступной для других средств диагностирования, применяемых сегодня на УЗ.

2.3.1 Вычисление частотного спектра рабочего тока электродвигателя

Основой автоматизированной диагностики является анализ частотного спектра рабочего тока электродвигателя [87]. Возникновение каждой неисправности приводит к появлению в спектре тока двигателя новых гармоник определенной частоты и интенсивности. Примеры спектров токов электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов модели МСП-0,25 с различными неисправностями представлены на рис. 2.5.

Рисунок 2.5 – Спектры токов двигателя модели МСП-0,25 для следующих типов неисправностей: а) короткое замыкание пластин коллектора; б) короткое замыкание секции якоря; в) круговой огонь по коллектору; г) обрыв секции якоря.

Для получения спектра рабочий ток двигателя был дискретизирован. Разрядность выборки составляла 16 бит. Была выбрана частота

дискретизации $f_{\text{диск}} \text{ Гц}$. Для последующей обработки полученная последовательность дискретных значений записывалась в wav-файлы, соответствующие стандарту файлов uncompressed Microsoft PCM audio [4, 82]. Согласно теореме Найквиста-Котельникова максимальная частота спектра $f_{\text{макс}}$ после дискретизации аналогового сигнала составила

(2.1)

$f_{\text{макс}}$,

что достаточно для отражения физических процессов в двигателе.

Частотный спектр тока двигателя был получен посредством быстрого преобразования Фурье (FFT) [13, 59]. Размер блока FFT N был выбран равным N . Следовательно, ток двигателя был представлен

(2.2)

гармониками преобразования Фурье. Частотное разрешение гармоник спектра при этом составило

(2.3)

Гц.

В результате обработки получали множество гармоник преобразования Фурье тока двигателя. Каждая гармоника в этом множестве имеет частоту

(2.4)

Гц,

и представлена парой коэффициентов , .

Для каждой гармоники преобразования Фурье вычислялась интенсивность частоты :

(2.5)

2.3.2 Анализ гармоник частотного спектра рабочего тока электродвигателя стрелочного перевода

Рабочий ток исправного электродвигателя состоит из постоянной составляющей и огибающей ее переменной составляющей.

Электродвигатели стрелочных переводов могут получать питание от выпрямителей, тогда их следует рассматривать как электродвигатели пульсирующего выпрямленного тока. Переменные составляющие возникают по следующим причинам [60, 74].

Во-первых, цепь схемы выпрямления представляет собой генератор нулевого напряжения, которое содержит ряд гармоник: частотой 100 Гц при однофазной мостовой схеме выпрямления или 300 Гц при трехфазной мостовой схеме выпрямления. На выходе выпрямителя будет присутствовать первая гармоника $f_1 = 50 * m$, где m число последовательных колец вентилей и обмоток силового трансформатора. Для однофазной мостовой схемы выпрямителя $m = 2$, а для трехфазной мостовой схемы $m = 6$.

Во-вторых, в токе присутствует гармоника, пропорциональная скорости вращения якоря. Она возникает в силу того, что щетка коллектора более широкая, чем его ламели. Это приводит к закорачиванию одной или двух ламелей якоря. Эта гармоническая составляющая получила

название «скоростная частота» [60].

Таким образом, при исправной работе электродвигателя возникают три гармоники:

$$\sum f_1 = f_{n1\phi} + f_{n3\phi} + f_{i \text{ скор.}}, \quad (2.6)$$

где $f_{n1\phi}$ частота гармоники, которая возникает в результате работы однофазной мостовой схемы выпрямления;

$f_{n3\phi}$ частота гармоники, которая возникает в результате работы трехфазной мостовой схемы выпрямления;

$f_{i \text{ скор.}}$ – «скоростная частота».

При отклонении режима работы электродвигателя от нормального спектр гармоник обогащается:

- за счет ухудшения условий коммутации: случайная аperiodическая гармоника, которая возникает за счет эксцентриситета коллектора;
- за счет загрязнения коллектора графитовой пылью; в результате появляются токи утечки между ламелями коллектора;
- при обрывах или коротком замыкании в секциях якоря появляется гармоника, которая зависит от скорости вращения; например, для двигателя со скоростью вращения $n = 1500 \text{ об/мин} = 25 \text{ об/с}$, период частоты за одно вращение составит $25 \cdot 2 = 50 \text{ Гц}$ (обороты можно измерять с помощью частотомера ЧЗ-38, который работает в режиме тахогенератора).

Таким образом, в токе электродвигателя могут присутствовать шесть гармонических составляющих, если не учитывать его обороты. Следовательно, полную информацию о составе гармоник можно получить в результате разложения функции в ряд Фурье. Этот подход был принят за основу при разработке аналитического метода определения характера неисправностей стрелочного электродвигателя постоянного тока типа МСП.

Следует отметить, что устройство для согласования рабочих цепей стрелочного электропривода с персональным компьютером, несмотря на простоту, имеет недостаток, который вызван нелинейной зависимостью сопротивления входной цепи ($L_{\text{тр}}$ или C) от частоты (рис. 2.4). Благодаря проведению ряда опытов были найдены наиболее рациональные параметры входной цепи для диапазона частот от 10 до 4000 Гц, который является наиболее характерным для выявления неисправностей в электродвигателях стрелочных переводов.

На рис. 2.6 представлен спектр гармоник «эталонного» исправного электродвигателя. Здесь четко проявляются гармоники 100, 300 и $2 \cdot 300 = 600 \text{ Гц}$.

3 Рисунок 2.6 – Спектрограмма исправного электродвигателя постоянного тока типа МСП: 1 – гармоника, которая возникает в результате

непритертости щеток; 2 – гармоника 100 Гц, которая возникает в результате работы однофазной мостовой схемы; 3 – первая гармоника выпрямителя (300 Гц), что возникает в результате работы трехфазной мостовой схемы; 4 – вторая гармоника трехфазного выпрямителя (600 Гц); 5 – гармоничная составляющая скоростной частоты.

Спектрограмма двигателя с двумя короткими замыканиями представлена на рис. 2.7. В результате исследования спектрограммы (рис. 2.7) оказалось, что в спектре рабочего тока, кроме описанных выше частот, присущих исправному электродвигателю, появилась гармоника частотой 70 Гц. Это основная частота гармоника отказа.

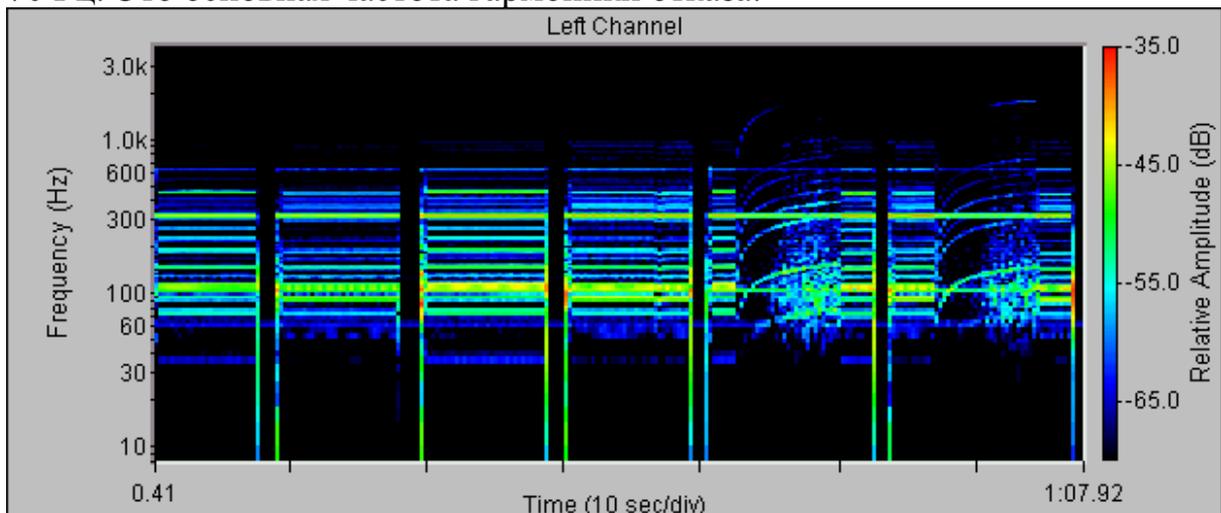


Рисунок 2.7 – Спектрограмма электродвигателя типа МСП-0,15 с двумя короткими замыканиями в секциях якоря

Определим по частоте отказа обороты двигателя по формуле:

$$n = ((f_0 / 2) / 2) * 60 = 1050 \text{ об/мин,}$$

где $f_0 = 70$ Гц;

2 – число щеток;

2 – число коротких замыканий;

60 – число секунд в минуте.

При скоростной частоте 423 Гц и числе ламелей равным 24, получаем, что частота вращения ротора двигателя составляет

$$(423 / 24) * 60 = 1050 \text{ об/мин.}$$

То есть отношение скоростной частоты к основной частоте составило $423 / 24 = 6,04$ раз.

Представленные расчеты подтверждают показания тахометра, которые по результатам измерений составили 1050 1060 об/мин.

Поскольку в двигателе два коротких замыкания, то каждое из них за один оборот двигателя проявляется дважды. Коллектор двигателя имеет 24 пластины. За один оборот возникает 24 min и max колебаний сопротивления секций якоря.

Проверка электродвигателей на стенде состояла из шести опытов:

- 1) и 2) – правое и левое вращение с дросселем (эквивалент индуктивности кабеля длиной в 1км.);
 3) и 4) – правое и левое вращение без дросселя;
 5) и 6) – два опыта холостого хода.

Режим испытаний:

- МСП-0,25: $U - 180\text{v}$, $I - 3\text{ A}$;
- МСП-0,15: $U - 180\text{v}$, $I - 2\text{ A}$;
- ДП-0,18: $U - 180\text{v}$, $I - 2\text{ A}$.

Во время испытаний обороты двигателя контролировались частотомером ЧЗ-33 в режиме тахометра. С ростом тока нагрузки электродвигателя, как и следовало ожидать, амплитуды гармоник растут, более ярко проявляются частоты гармоник на спектрограмме.

Спектрограмма и осциллограмма исправного электродвигателя модели ДП-0,18 отображены на рис. 2.8 и рис. 2.9 соответственно. Электродвигатели ДП-0,18 имеют следующие характеристики: 57 коллекторных пластин, четыре полюса, четыре щетки, волновая обмотка.

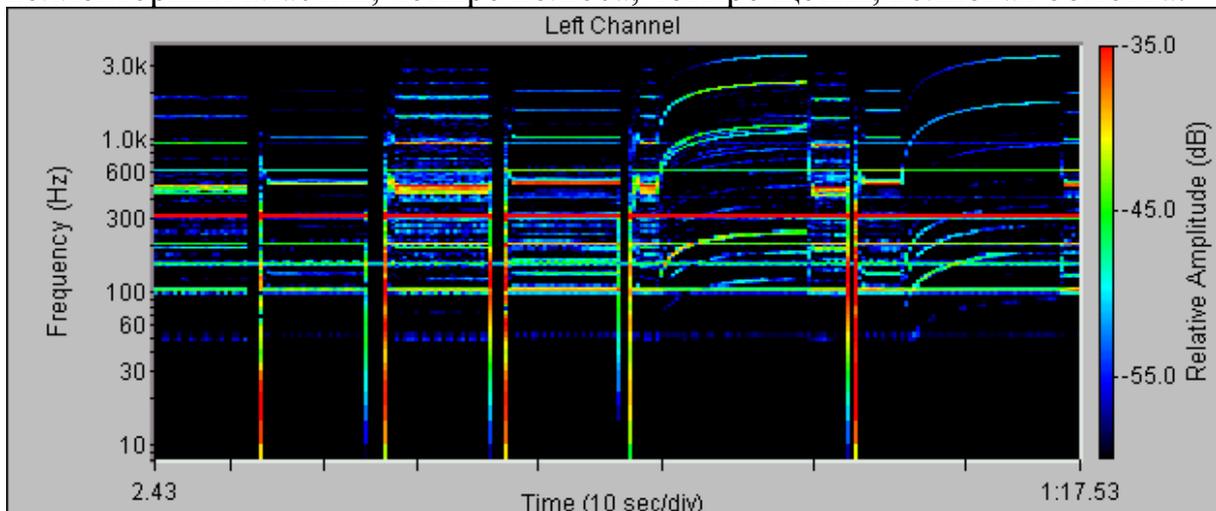


Рисунок 2.8 – Спектрограмма исправного электродвигателя модели ДП-0,18

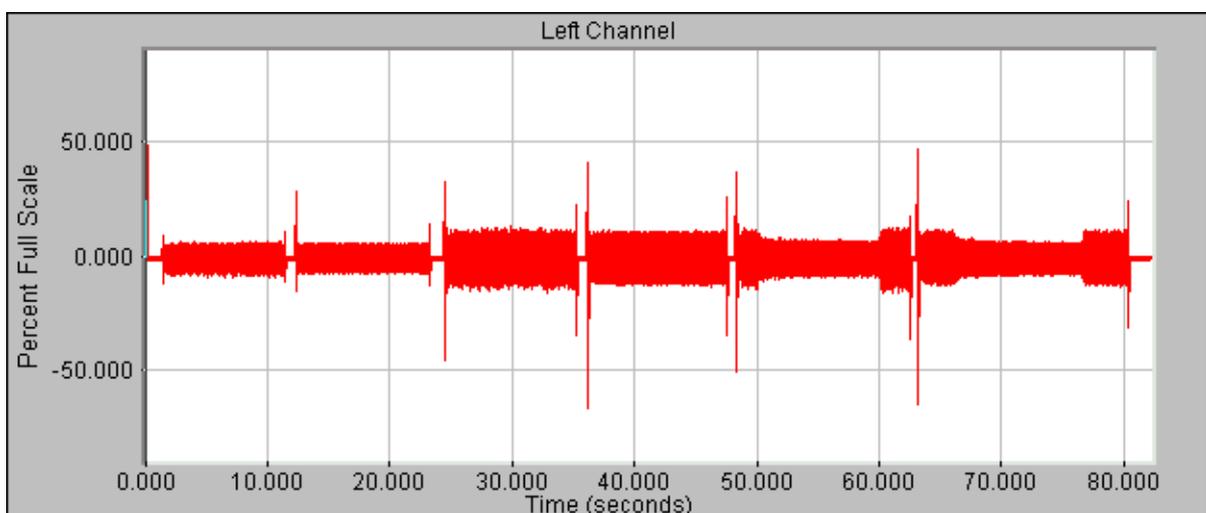


Рисунок 2.9 – Осциллограмма исправного электродвигателя модели ДП-0,18

Для изучения частотных характеристик отказа в исправном ЭД (рис. 2.8) искусственно был выполнен один обрыв и получены соответствующие спектрограмма (рис. 2.10) и осциллограмма (рис. 2.11).

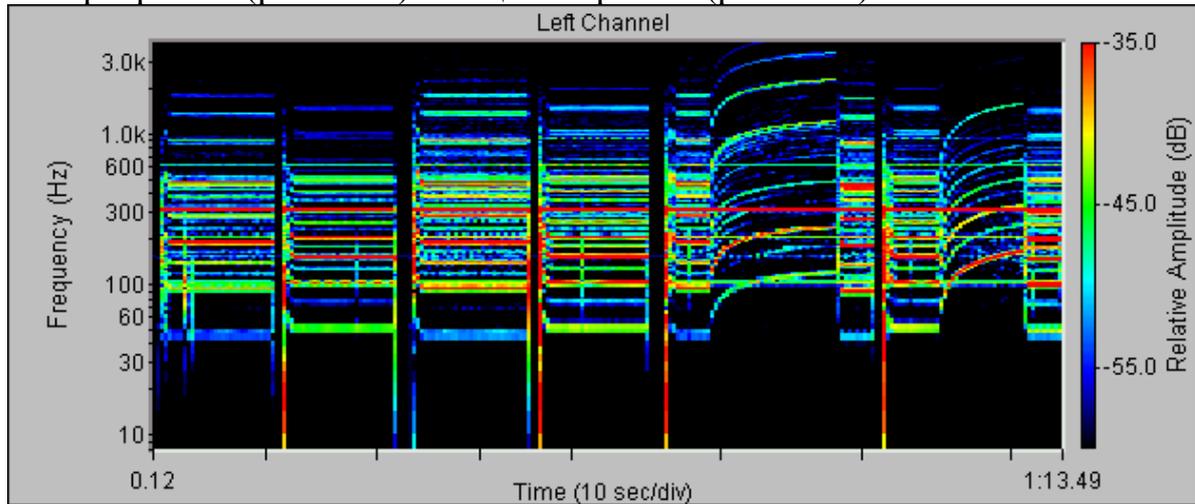


Рисунок 2.10 – Спектрограмма электродвигателя модели ДП-0,18 с искусственно вызванным обрывом

Примеры спектрограмм рабочего тока электродвигателей с другими типами неисправностей представлены в приложении Г.

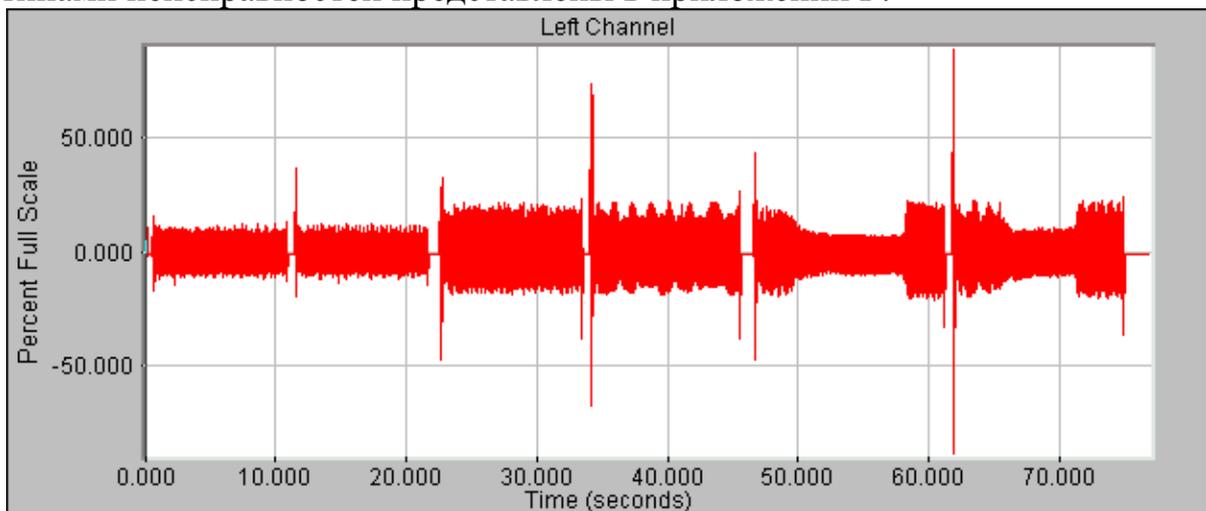


Рисунок 2.11 – Осциллограмма электродвигателя модели ДП-0,18 с искусственно вызванным обрывом

Анализ частотного спектра рабочего тока электродвигателя стрелочного перевода показал возможность выявления неисправностей на основе множества гармоник спектрального разложения. Каждая неисправность проявляет себя посредством гармоник определенной частоты. Частоту гармоники, что соответствует заданной неисправности, можно рассчитать аналитически на основе параметров двигателя (частота оборотов, число щеток, ...). Аналитический расчет частот гармоник для неисправностей проводится экспертом [42, REF_Ref324873294 \h 55, 70, 102]. Такой расчет был использован при разработке экспертных систем автоматизированной диагностики электродвигателей (см. 3.3).

Выводы

Предложен и внедрен аппаратно-программный комплекс дистанционного диагностирования двигателей стрелочных переводов. Сформулированы требования к АПК дистанционной диагностики двигателей постоянного тока стрелочных переводов, разработана структура комплекса. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для реализации дистанционного диагностирования электродвигателей стрелочных электроприводов. Для выявления неисправностей комплекс использует метод спектрального анализа рабочего тока электродвигателя на основе быстрого преобразования Фурье.

Диагностика электродвигателя может проводиться на стенде во время его планового осмотра. Для электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов возможен мониторинг их технического состояния без извлечения из стрелочного привода. Кабеля, питающие стрелочные двигатели, сводятся в релейную. При снятии кривой тока электродвигателя в релейной возможен постоянный контроль технического состояния всех стрелочных электродвигателей на станции. Разрабатываемая система диагностики способна оповещать персонал о появлении в двигатели определенной неисправности, что делает возможным замену электродвигателя до его полного выхода из строя.

Разработанная система автоматизированной диагностики производит измерения характеристик двигателя, находящегося под воздействием номинальных, рабочих значений напряжения, тока, магнитного поля и центробежных сил, что позволяет выявлять больше неисправностей, чем при использовании статических методов диагностики. Разработанные модели диагностики «обучаются» выявлять дополнительные неисправности. Применение моделей не требует высококвалифицированного инженера электромеханика как для настройки, так и для эксплуатации.

Разработана методика и программа испытаний аппаратно-программного комплекса в условиях ремонтно-технологических участков (РТУ) дистанций Сигнализации и связи и постов электрических централизаций. Проведено испытание аппаратно-программного комплекса для дистанционного диагностирования состояния электродвигателей стрелочных электроприводов. Результат позитивен. Даны предложения относительно использования комплекса в технологическом цикле обслуживания устройств электрической централизации.

Аппаратно-программный комплекс разработан с учетом расширения его функциональных возможностей. При накоплении материала по динамике изменения параметров электрических двигателей во времени диагностический комплекс открывает пути для последующего усовершенствования профилактики и изменения сроков в техническом обслуживании и ремонте, что является выгодным с экономической точки

зрения.

Материалы раздела опубликованы в работах [85, 108, 109, 110, 111].

РАЗДЕЛ 3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАРКОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ ПО ТЕКУЩЕМУ СОСТОЯНИЮ СРЕДСТВАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

3.1 Основные задачи повышения эффективности технической эксплуатации парков электродвигателей по текущему состоянию средствами интеллектуальных систем

Повышение эффективности технической эксплуатации парков электродвигателей (ПЭД) железнодорожных стрелочных переводов (СП) является актуальной задачей, решение которой позволит повысить безопасность железнодорожных перевозок и снизить затраты на обслуживание парка ЭД. Сегодня на железных дорогах Украины техническое обслуживание стрелок электрической централизации выполняется по графику планово-предупредительных работ, установленному согласно инструкциям ЦШ [69]. Основным направлением повышения эффективности технической эксплуатации ПЭД СП является переход от планово-предупредительного метода к обслуживанию ЭД по текущему техническому состоянию.

Для решения задачи увеличения эффективности эксплуатации ПЭД необходимо решить множество подзадач. Такими подзадачами являются:

- диагностирование электродвигателя в условиях рабочей нагрузки и без извлечения ЭД из привода;
- прогнозирование технического состояния ЭД на основе исторических данных о выявленных в двигателе неисправностях;
- определение очередности ремонтов неисправных ЭД в случае недостатка ресурсов, необходимых для восстановления или замены двигателей.

По оценкам экспертов применяемые сегодня на УЗ методы диагностирования электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов не позволяют выявлять множество неисправностей ЭД [74]. Внедрение новых методов определения технического состояния электродвигателей в используемых на УЗ технологиях диагностирования ЭД СП является актуальной задачей. Наибольшее число неисправностей позволяют выявлять методы диагностирования ЭД, анализирующие параметры двигателей, которые находятся в режиме рабочей нагрузки под действием рабочих значений центробежных сил, электрического и магнитного полей. Новые технологии диагностирования ЭД СП должны позволять проводить удаленное определение технического состояния двигателя без его извлечения из стрелочного перевода. Подобное удаленное диагностирование возможно благодаря анализу рабочего тока

электродвигателя.

Задачу выявления неисправностей в электродвигателях можно отнести к задачам классификации [7], в которых необходимо определить степень принадлежности исследуемого ЭД к одному из заранее известных классов технического состояния, например: обрыв секций якоря, короткое замыкание секций якоря, распайка коллектора, короткое замыкание пластин коллектора, зависание щетки и т. д. Модели искусственных нейронных сетей (ИНС) нашли широкое применение в решении задач классификации объектов [20, 117]. На вход ИНС подаются параметры исследуемого электродвигателя, а на выходе получаем степени принадлежности ЭД к каждому из классов технического состояния (см. 3.2). В качестве входных параметров нейронной сети используется или дискретизированный рабочий ток электродвигателя непосредственно (см. 3.2.1), или множество интенсивностей гармоник спектрального разложения рабочего тока ЭД (см. 3.2.2).

Возникновение неисправности в ЭД приводит к появлению в рабочем токе двигателя новых гармоник определенной частоты и интенсивности. Анализируя множество гармоник тока ЭД можно сделать заключение о наличии или отсутствии определенных неисправностей, частотные характеристики которых известны. Автоматизировать процесс анализа частотного спектра электродвигателя на предмет наличия заданных гармоник, характеризующих определенные неисправности, позволяют модели экспертных систем (см. 3.3.1).

Частота и интенсивность гармоники, свойственной определенной неисправности ЭД, являются неточными величинами, значение которых изменяется в зависимости от конкретного двигателя, условий и режимов его эксплуатации. Задача детального описания частотного спектра неисправного ЭД потребовала использования нечетких моделей для задания значений частот и интенсивностей гармоник неисправностей (см. 3.3.2).

Для некоторых видов неисправностей электродвигателей значения частоты и интенсивности гармоник, характеризующих определенную неисправность, могут быть рассчитаны экспертом аналитически. Частотные характеристики других неисправностей возможно получить на основании анализа спектра рабочего тока эталонных электродвигателей, перечень неисправностей в которых известен. Для объединения в рамках одной модели знаний эксперта и статистической информации о частотных характеристиках неисправностей ЭД была разработана экспертная система классификации объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил (см. 3.3.3).

Электродвигатели железнодорожных стрелочных переводов способны функционировать после возникновения в них некоторых неисправностей. Работа ЭД с неисправностью приводит к дальнейшей порче компонентов двигателя. Чем дольше ЭД работает с неисправностью, тем дороже обойдется его восстановление. При эксплуатации ПЭД СП

диагностирование двигателей позволяет определить множество неисправных ЭД. Если необходимые для восстановления двигателей ресурсы ограничены, то возникает задача определения очередности ремонта неисправных ЭД. При этом необходимо учитывать не только текущее техническое состояние двигателя, но и его техническое состояние в будущем. Прогноз развития неисправностей ЭД позволяет сделать более точные оценки порядка ремонта электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов (см. 4.3).

3.2 Выявление неисправностей в электродвигателях постоянного тока методами искусственных нейронных сетей на основе опытных данных образцов двигателей с эталонными неисправностями

3.2.1 Выявление неисправностей в электродвигателях постоянного тока с использованием моделей искусственных нейронных сетей на основе дискретизации рабочего тока двигателя

Диагностика электродвигателей относится к задачам классификации, когда определяется принадлежность входного набора данных к одному из нескольких заранее известных классов неисправностей. Входными данными для ИНС-модели является кривая тока электродвигателя, представленная в форме импульсно-кодовой модуляции. Выходом является оценка технического состояния электродвигателя: дается заключение о его исправности или указывается перечень присутствующих в нем неисправностей. Система диагностирования (СД) способна выявлять неисправности после обработки множества эталонных кривых тока двигателей, техническое состояние которых известно. Она позволяет производить автоматическую настройку модели для выявления новых неисправностей. Нейронная сеть хорошо моделирует нелинейные зависимости и устойчива к шумам, присутствующим в обучающих данных [101, 104].

Разработанная модель ИНС создавалась для выявления неисправностей электродвигателей постоянного тока модели МСП-0,25 железнодорожных стрелочных приводов. При диагностике устанавливаются четыре класса технического состояния электродвигателя: исправен, короткое замыкание обмотки, короткое замыкание пластин коллектора и обрыв секции якоря. Для подбора обучающих данных использовались электродвигатели, принадлежащие ко всем четырем классам неисправностей. Техническое состояние каждого двигателя устанавливалось экспертной оценкой.

Проводилось преобразование рабочего тока электродвигателя в форму импульсно-кодовой модуляции. Для преобразования аналогового сигнала была выбрана частота дискретизации равная 11025 герц. Разрядность выборки составляла 16 бит. Полученная последовательность дискретных

значений записывалась в wav-файлы, соответствующие стандарту файлов uncompressed Microsoft PCM audio. Примеры кривых тока исправного и неисправных электродвигателей представлены на рис. 3.1.

Рисунок 3.1 – Примеры кривых тока: а) исправного двигателя; б) двигателя с коротким замыканием обмотки; в) двигателя с коротким замыканием пластин коллектора; г) двигателя с обрывом секции якоря.

3.2.1.1 Выбор и испытание архитектуры нейросети

Для классификации неисправностей электродвигателей используется модель нейронной сети, основанная на многослойных персептронах (MLP). Многослойный персептрон способен моделировать функцию практически любой степени сложности и хорошо работает при решении задач классификации [101].

Начальная конфигурация многослойного персептрона формировалась следующим образом. При частоте дискретизации равной 11025 герц за время генерации 512 выборок якорь электродвигателя успевает сделать полный оборот. Можно считать, что 512 последовательных отсчетов импульсно-кодовой модуляции описывают один оборот якоря двигателя. На вход нейронной сети подавалось 512 последовательных отсчетов, что и задавало количество нейронов во входном слое.

Для представления каждого из четырех классов неисправностей в числовой форме использовалось кодирование 1-из-N. Каждый класс неисправности был представлен вектором числовых значений: исправен – $\{1, 0, 0, 0\}$, короткое замыкание обмотки – $\{0, 1, 0, 0\}$, короткое замыкание пластин коллектора – $\{0, 0, 1, 0\}$ и обрыв секции якоря – $\{0, 0, 0, 1\}$. Метод кодирования номинальных выходных переменных определил количество нейронов в выходном слое сети равным 4. Начальные значения весов и смещений нейронов выходного слоя выбирались случайным образом.

Для вычисления величины постсинаптического потенциала нейронов выходного слоя использовалась линейная PSP-функция

(3.1)

где x_i – величина сигнала на i -ом входе нейрона;

w_{ij} – вес i -ого входа;

b_j – величина смещения;

N – количество входов нейрона.

Начальная конфигурация многослойного персептрона включала один скрытый слой нейронов. MLP с одним скрытым слоем может

моделировать большинство реальных задач [101]. Согласно эвристическому правилу, начальное количество нейронов в скрытом слое равнялось полусумме числа входных и выходных нейронов сети.

Для выбора наилучшей конфигурации были исследованы сети с различным количеством нейронов в скрытом слое. В процессе подбора свойств нейронной сети также использовались различные функции активации нейронов как скрытого, так и выходного слоя. Исследовались следующие функции активации: линейная, логистическая, гиперболический тангенс и экспоненциальная.

Подбор конфигурации нейронной сети проводился на основе стандартного статистического подхода перекрестной проверки (cross-validation) [124]. В рамках него данные случайным образом разбивались на обучающее (training set) и тестовое множества (test set). Обучающее множество, в свою очередь, разбивалось на два подмножества: оценивания (estimation subset), используемое для непосредственного обучения сети, и проверочное (validation subset), предназначенное для предотвращения переобучения сети.

Обучение многослойного персептрона проводилось по методу раннего останова [118]. Согласно методу проводился анализ кривой ошибки обучения на подмножестве оценивания и кривой ошибки обучения на проверочном подмножестве.

При исследованиях кривая ошибки обучения на подмножестве оценивания монотонно убывала с увеличением количества эпох, в то время как кривая обучения на проверочном подмножестве монотонно убывала до некоторого минимума, после чего при продолжении обучения начинала возрастать. После прохождения минимума сеть «обучалась» шумам, содержащимся в обучающей выборке. Точка минимума кривой обучения на проверочном множестве использовалась в качестве критерия останова сеанса обучения [101, с. 292].

Явление возрастания ошибки обучения на проверочном подмножестве после прохождения минимума свидетельствует о чрезмерной сложности сети для моделирования задачи диагностики электродвигателей. В этом случае проводилось уменьшение числа нейронов в скрытом слое сети. Далее обучение сети начиналось сначала.

Когда ошибки обучения на подмножестве оценивания и на проверочном подмножестве не достигают достаточного уровня малости, то текущая архитектура сети является «слабой» для моделируемой зависимости. В этом случае увеличивалось количество нейронов в скрытом слое и обучение сети начиналось сначала.

Качество классификации неисправностей электродвигателей сетями различных архитектур представлено в табл. 3.1. В столбце „Сеть” указаны исследуемые конфигурации многослойного персептрона, количество нейронов во входном, скрытом и выходном слоях. Следующие три столбца показывают процент правильно классифицированных образцов на подмножествах оценивания, проверки и тестовом множестве для каждой

из сетей.

Обучение сетей выполнено алгоритмом BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). Этот алгоритм обучает за меньшее количество итераций по сравнению с более традиционными алгоритмами (обратного распространения или сопряженных градиентов), однако, BFGS требует больше вычислительных ресурсов и использует больше оперативной памяти. В табл. 3.1 указано количество эпох, затраченное на обучение каждой сети.

Таблица 3.1 – Классификация неисправностей сетями различных архитектур

Сеть	Оценивание %	Проверка %	Тест %	Алгоритм обучения, N эпох	Функция ошибки	Активация скрытого слоя	Активация выходного слоя
MLP 512-135-4	99,49750	92,85714	89,28571	BFGS 119	SOS	Logistic	Logistic
MLP 512-148-4	65,82915	71,42857	46,42857	BFGS 45	SOS	Exponential	Identity
MLP 512-170-4	72,36181	66,07143	46,42857	BFGS 44	SOS	Tanh	Tanh
MLP 512-146-4	74,87437	75,00000	57,14286	BFGS 41	SOS	Tanh	Identity
MLP 512-160-4	58,29146	66,07143	42,85714	BFGS 23	SOS	Logistic	Tanh
MLP 512-149-4	98,49246	94,64286	89,28571	BFGS 165	SOS	Exponential	Exponential
MLP 512-190-4	59,29648	58,92857	35,71429	BFGS 17	SOS	Identity	Tanh
Среди множества архитектур была выбрана сеть, имеющая больший процент правильно классифицированных образцов на подмножествах оценивания, проверки и	(3.2)						

<p>тестовом множестве . Среди сетей, показывающих примерно равный процент правильно классифицированных образцов , выбиралась сеть, имеющая меньшее количество нейронов в скрытом слое.</p> <p>3.2.1.2 Решение задачи классификации неисправностей электродвигателей в условиях эксплуатации на основе нейросетевой модели</p> <p>В результате множества</p>	
---	--

<p>экспериментов с сетями различных архитектур (см. табл. 3.1) была выбрана нейронная сеть, которая классифицирует неисправности электродвигателей наилучшим образом. Архитектура выбранной сети представлена в табл. 3.1 в первой строке. Количество нейронов в скрытом слое этой сети составило 135.</p> <p>В качестве функции</p>	
--	--

активаци и нейроно в выходно го слоя использо валась логистич еская функция	,
---	---

где U – величина постсинаптического потенциала нейрона.

Постсинаптический потенциал нейронов скрытого слоя вычислялся с использованием линейной PSP-функции (3.1). Перед обучением сети весам и смещениям нейронов скрытого слоя были присвоены случайные значения.

В процессе работы нейронной сети на ее вход подавался вектор входных значений и вычислялся вектор выходных. Каждый элемент выходного вектора принимал значения в диапазоне (0; 1), согласно (3.2). При определении класса неисправности электродвигателя для нейронов выходного слоя был установлен доверительный предел, равный 0.95. Выходной нейрон считался активным, если значение его выходного сигнала превышало доверительный предел. Если величина сигнала на выходе всех нейронов не превышала 0.95, то нельзя сделать достоверное заключение о принадлежности входного образца к одному из классов неисправностей электродвигателей. Как альтернатива доверительным пределам при определении принадлежности входного образца к одному из классов использовалось максимальное значение сигнала.

В табл. 3.2 представлены результаты классификации неисправностей электродвигателей на обучающем множестве. При этом качество классификации технического состояния электродвигателей определялось на данных, которые не были задействованы в процессе обучения сети (табл. 3.3). Анализ результатов классификации показывает, что нейронная сеть безошибочно определяет исправное состояние ЭД и неисправность «короткое замыкание пластин коллектора», остальные классы технического состояния двигателя определяются с небольшой погрешностью.

Таблица 3.2 – Оценки точности диагностики на обучающем множестве

	Исправе н	Кз_ обмотки	Кз_пл_ кол	Обр_сек_ якоря
Исправен	47	0	0	0
Кз_обмотки	0	95	0	2
Кз_пл_кол	0	2	47	0
Обр_сек_ якоря	0	1	0	61
Total	47	98	47	63
Correct	47	95	47	61
Incorrect	0	3	0	2
Correct (%)	100	97	100	97
Incorrect (%)	0	3	0	3

Таблица 3.3 – Оценки точности диагностики на тестовом множестве

	Исправен	Кз_обмотки	Кз_пл_кол	Обр_сек_якоря
Исправен	9	0	0	0
Кз_обмотки	0	5	0	2
Кз_пл_кол	0	1	4	0
Обр_сек_якоря	0	0	0	7
Total	9	6	4	9
Correct	9	5	4	7
Incorrect	0	1	0	2
Correct (%)	100	83	100	78
Incorrect (%)	0	17	0	22

3.2.2 Выявление неисправностей в электродвигателях постоянного тока на основе нейронно-сетового моделирования данных спектрального разложения токов

Предложен метод автоматизированной диагностики электродвигателей, использующий нейронную сеть, выявляющую неисправности электродвигателя на основе анализа частотного спектра протекающего через двигатель тока. Основой метода диагностики служит разложение рабочего тока электродвигателя на гармоники преобразования Фурье (см. п. 2.2). Для каждой гармоники вычисляется ее интенсивность согласно формуле (2.5). Множество интенсивностей гармоник используется, чтобы обучить искусственную нейронную сеть

обнаруживать неисправности в электродвигателе.

3.2.2.1 Задача диагностирования неисправностей электродвигателей средствами нейронных сетей

Анализ частот и интенсивностей гармоник в спектре тока электродвигателя позволяет выявлять в нем неисправности. Зная технические характеристики двигателя и режим его работы, возможно создание математической модели физических процессов в двигателе. При этом возможно аналитически получить значения частот и интенсивностей гармоник, присущих неисправностям двигателя. Создание аналитических моделей неисправностей имеет ряд недостатков. Каждая новая неисправность в двигателе требует создания новой модели. Значения частоты и интенсивности гармоник, свойственных для неисправности, являются довольно зашумленными, их значения изменяются во времени при «старении» неисправности. Составление подобных моделей возможно не для всех типов неисправностей электродвигателей.

Предлагаемый подход к выявлению неисправностей в электродвигателях основан на использовании аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС) [99, 101] и обладает рядом преимуществ. Для диагностики новой неисправности нет необходимости в создании новой математической модели физических процессов в двигателе. Нейронные сети способны «обучаться» на примерах. Для выявления любой новой неисправности сетью, достаточно располагать эталонным двигателем, в котором имеется данная неисправность. Частотный спектр эталонного двигателя используется, чтобы автоматизировано настроить сеть определять новую неисправность. Искусственные нейронные сети хорошо работают при решении задач большой размерности, к которым относится задача анализа множества гармоник спектра тока электродвигателя. ИНС нелинейны по своей природе и при выявлении неисправностей способны моделировать непрерывную функцию любой степени сложности. Нейронные сети устойчивы к шумам, присутствующим в обучающих данных о частоте и интенсивности гармоник неисправностей.

Выявление неисправностей в электродвигателях в теории искусственных нейронных сетей можно отнести к задачам классификации. В задачах классификации необходимо определить, к какому из нескольких заданных классов принадлежит входной набор данных.

Задача классификации может быть решена нейронными сетями следующих архитектур: многослойный персептрон (MLP) [54, 77], радиальная базисная функция (RBF), сеть Кохонена (SOFM) [38, 120]. При выявлении неисправностей в электродвигателях средствами нейронных сетей использовался один и тот же формат входных и выходных данных для сетей различных архитектур.

Для обучения нейронных сетей была создана база данных спектральных характеристик эталонных двигателей. Для эталонных двигателей эксперт определял перечень присутствующих в них неисправностей. Спектральные характеристики эталонных электродвигателей определялись посредством быстрого преобразования Фурье тока двигателя, согласно (2.5). На вход нейронной сети подавался вектор, содержащий величины интенсивностей гармоник. Число нейронов во входном слое сети равнялось количеству элементов вектора интенсивностей (2.2).

На выходе нейронной сети получали оценку технического состояния электродвигателя. В работе представлены результаты диагностики электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных приводов модели МСП-0,25. При выявлении неисправностей в двигателе определялась его принадлежность к следующим классам технического состояния: исправен, короткое замыкание обмотки, короткое замыкание пластин коллектора, круговой огонь по коллектору, обрыв секции якоря. Для представления технического состояния двигателя на выходе нейронной сети использовалось кодирование 1-из-N. При кодировании 1-из-N каждый класс технического состояния двигателя был представлен вектором числовых значений. Число элементов вектора равнялось количеству классов неисправностей. Каждый класс неисправности кодировался следующим образом: исправен – [1, 0, 0, 0, 0], короткое замыкание обмотки – [0, 1, 0, 0, 0], короткое замыкание пластин коллектора – [0, 0, 1, 0, 0], круговой огонь по коллектору – [0, 0, 0, 1, 0], обрыв секции якоря – [0, 0, 0, 0, 1]. Количество нейронов в выходном слое сети равнялось числу элементов вектора класса неисправности.

В нейронах выходного слоя сети использовалась логистическая функция активации (3.2), что определило диапазон возможных значений выходных элементов равный (0; 1). Для определения класса технического состояния двигателя по значениям выходных элементов сети использовались пороги принятия и отвержения. Был применен следующий алгоритм определения класса: класс выбирался только в том случае, если значение элемента с максимальным уровнем выходного сигнала больше или равно порогу принятия, а всех остальных выходных элементов – ниже порога отвержения. В противном случае класс считался неопределенным. При использовании порога принятия равного 0.0 и порога отвержения равного 1.0 алгоритм определения класса технического состояния электродвигателя сводился к выбору элемента, имеющего максимальный уровень выходного сигнала.

3.2.2.2 Диагностирование неисправностей электродвигателей стрелочных переводов на основе нейронной сети многослойный персептрон

Выбор конфигурации многослойного персептрона проводился средствами стандартного статистического подхода перекрестной проверки (cross-validation) [124]. В рамках подхода данные случайным образом разбивались на обучающее (training set) и тестовое множества (test set). Обучающее множество, в свою очередь, разбивалось на два подмножества: оценивания (estimation subset), используемое для непосредственного обучения сети, и проверочное (validation subset), предназначенное для предотвращения переобучения сети. Обучение MLP проводилось по методу раннего останова [118].

Для определения технического состояния электродвигателя наилучшие результаты показали многослойные персептроны, архитектура которых представлена в табл. 3.4. В столбце “Сеть” представлена структура MLP, указано количество нейронов во входном, скрытом и выходном слоях. Следующие три столбца показывают процент правильно классифицированных образцов на подмножествах оценивания, проверки и тестовом множестве. Была использована функция ошибки сумма квадратов (SOS).

Таблица 3.4 – Архитектура и эффективность многослойных персептронов

Сеть	Оценивание %	Тест %	Проверка %	Алгоритм обучения, N эпох	Функция ошибки	Активация скрытого слоя	Активация выходного слоя
MLP 256-64-5	92,23	93,10	96,55	BFGS 17	SOS	Logistic	Logistic
MLP 256-74-5	94,66	93,10	94,83	BFGS 7	SOS	Tanh	Logistic
MLP 256-69-5	94,66	93,10	96,55	BFGS 21	SOS	Exponential	Logistic

При обучении персептронов был применен алгоритм BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). Этот алгоритм обучает сеть за меньшее количество итераций по сравнению с алгоритмом обратного распространения, но BFGS требует больше вычислительных ресурсов и оперативной памяти. В табл. 3.4 указано количество эпох, затраченное на обучение каждой сети, а также функции активации нейронов скрытого и выходного слоев.

Качество диагностики электродвигателей сетями MLP определялось с помощью матрицы неточностей. Для сети MLP 256-64-5 (табл. 3.4) матрица неточностей на обучающем множестве представлена в табл. 3.5, а матрица неточностей на тестовом множестве – в табл. 3.6.

Таблица 3.5 – Матрица неточностей на обучающем множестве сети MLP 256-64-5

	Исп рав ен	Кз_ обм отк и	Кз_ пл_ кол	Кру г_ ого нь_ кол	Об р_ сек - яко ря
Исправен	54	0	8	0	0
Кз_обмотки	0	92	0	0	0
Кз_пл_кол	0	1	39	6	1
Круг_огонь_кол	0	0	0	0	0
Обр_сек_якоря	0	0	0	2	61
Total	54	93	47	8	62
Correct	54	92	39	0	61
Incorrect	0	1	8	8	1
Correct (%)	100	99	83	0	98
Incorrect (%)	0	1	17	100	2

Таблица 3.6 – Матрица неточностей на тестовом множестве сети
MLP 256-64-5

	Ис пра вен	Кз_ обм отк и	Кз_ пл_ кол	Кру г_ ого нь_ кол	Об р_ сек - яко ря
Исправен	2	0	0	0	0
Кз_обмотки	0	11	0	0	0
Кз_пл_кол	0	0	4	1	0
Круг_огонь_кол	0	0	0	0	0
Обр_сек_якоря	0	0	0	1	10
Total	2	11	4	2	10
Correct	2	11	4	0	10
Incorrect	0	0	0	2	0
Correct (%)	100	100	100	0	100
Incorrect (%)	0	0	0	100	0

Одним из недостатков использования многослойных персептронов при определении технического состояния электродвигателей является

неспособность MLP с большим количеством связей качественно обучаться при малом количестве входных образцов [101]. Количество эталонных электродвигателей, используемых для обучения нейронной сети, мало и составляет единицы штук. Согласно эвристическому правилу, количество обучающих образцов, необходимое для обучения MLP, должно быть минимум в 10 раз больше числа связей в сети, составлять сотни или тысячи образцов.

3.2.2.3 Диагностирование неисправностей средствами сети радиальная базисная функция

При решении задачи определения технического состояния электродвигателей RBF сеть обучается на порядок быстрее, чем MLP. Количество элементов в скрытом слое сети RBF значительно превышает количество элементов в скрытом слое MLP сети, что приводит к более медленной работе сети и требует больше оперативной памяти. Главный недостаток сети RBF – ее неспособность выявлять неисправности в электродвигателях для данного набора входных данных. Эксперименты показали, что даже при значительном количестве элементов в скрытом слое RBF сети, число правильно классифицированных образцов было крайне мало и составило примерно 30% (табл. 3.7).

Таблица 3.7 – Архитектура и эффективность сетей RBF

Сеть	Оценивание %	Тест%	Проверка %	Алгоритм обучения, N эпох	Функция ошибки	Активация скрытого слоя	Активация выходного слоя
RBF 256-206-5	34,47	31,03	41,38	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
RBF 256-206-5	34,47	31,03	41,38	RBFT	Entropy	Gaussian	Softmax
RBF 256-204-5	34,47	31,03	41,38	RBFT	SOS	Gaussian	Identity

3.2.2.4 Диагностирование неисправностей средствами сети Кохонена

Сеть Кохонена может быть использована для распознавания кластеров в спектральных характеристиках электродвигателей. Выявление кластеров позволяет сопоставить с ними классы технического состояния электродвигателей и использовать SOFM сеть для классификации неисправностей. Анализ взаимного расположения кластеров на топологической карте позволяет выявлять сходства или различия между различными классами неисправностей. Использование сети Кохонена делает возможным обнаружение новых неисправностей, при этом входные образцы будут размещены на топологической карте вне известных кластеров.

Входной слой сети Кохонена состоял из 256 элементов, на каждый из которых подавалась величина интенсивности гармоники преобразования Фурье тока электродвигателя согласно (2.5). Выходной слой сети представлял собой топологическую карту. В результате множества экспериментов наилучшую способность к кластеризации показала топологическая карта размерностью 3 на 5 элементов. Сеть SOFM отражает пространство входов размерностью 256 в двумерное пространство топологической карты. Радиус окрестности для выигравшего нейрона по мере обучения сети уменьшался линейно от 3 до 0. Топологическая карта для кластеризации спектральных характеристик электродвигателей представлена на рис. 3.2.

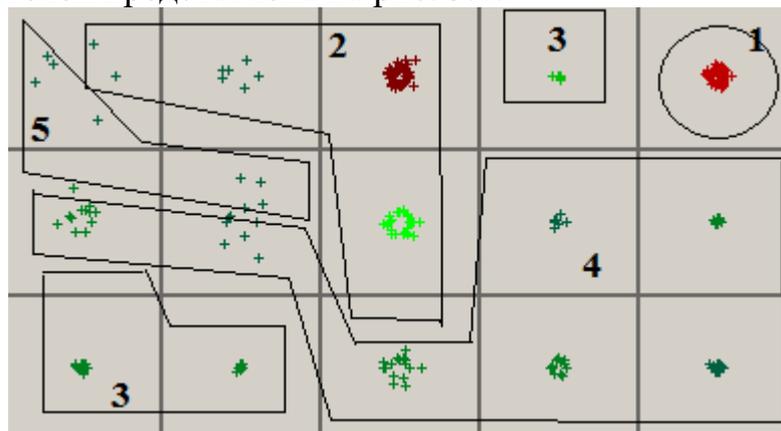


Рисунок 3.2 – Топологическая карта для кластеризации спектральных характеристик электродвигателей

На топологической карте показаны примерные границы кластеров технического состояния двигателя. Знаками «+» помечено положение входных образцов на карте, их близость к центрам нейронов и друг другу. Кластера обозначены следующим образом: исправен – 1, короткое замыкание обмотки – 2, короткое замыкание пластин коллектора – 3, обрыв секции якоря – 4, круговой огонь по коллектору – 5. Входные образцы, соответствующие исправному двигателю, хорошо локализованы, полностью соответствуют одному нейрону топологической карты. Кластера других типов неисправностей имеют небольшие перекрытия. Подробные данные о кластеризации спектральных характеристик электродвигателя на топологической карте представлены в табл. 3.8. Строки таблицы соответствуют классам технического состояния электродвигателя. Столбцы таблицы соответствуют индексу нейрона на топологической карте. Индекс верхнего левого нейрона равен 1. Далее нейроны индексируются в порядке возрастания слева направо и сверху вниз на топологической карте. Ячейки таблицы содержат число, которое показывает, сколько образцов заданного класса технического состояния электродвигателя соответствует нейрону топологической карты с определенным индексом.

Таблица 3.8 – Результаты кластеризации спектральных характеристик электродвигателя для сети SOFM 256-15

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Исправен					56										
Кз_обмот	2	6	67					25					4		
Кз_пл_кол				20		4					13	14			
Обр_сек_якор						8	6		7	14			12	14	11
Круг_огонь	4					1	5								

3.3 Диагностирование электродвигателей постоянного тока на основе нечетко-статистических моделей объектов

3.3.1 Выявление неисправностей в электродвигателях методами экспертных систем

Создание автоматизированной системы диагностики электродвигателей, основанной на применении экспертной системы [23, 100, 115], потребовало выполнения анализа и обработки значительного объема экспериментальных данных о процессах эксплуатации этих систем.

Основой экспертной системы автоматизированной диагностики является анализ частотного спектра тока электродвигателя (см. п. 2.2). Установлено, что возникновение каждого вида неисправности приводит к появлению в спектре тока двигателя новых гармоник определенной частоты и интенсивности. На рис. 2.5 представлены примеры спектров токов рассматриваемой модели ЭД МСП-0,25 с различными неисправностями.

Далее представлен пример формирования конкретной базы правил (БП) экспертной системы (ЭС) для диагностики электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных приводов МСП-0,25. При составлении базы правил были исследованы образцы двигателей, имеющие различное техническое состояние: исправен, короткое замыкание обмотки, короткое замыкание пластин коллектора, обрыв секции якоря, круговой огонь по коллектору. Был получен частотный спектр токов этих образцов. Частотный спектр каждого двигателя был представлен 256 интенсивностями гармоник быстрого преобразования Фурье согласно (2.5).

Для формирования БП были исследованы средние арифметические значения интенсивностей гармоник различных образцов электродвигателей. Далее через $M(i; k)$ будет обозначаться среднее арифметическое интенсивностей гармоник с индексами от i до k ($i < k$). На

рис. 3.3 представлен один из характерных графиков значений $M(1; 64)$, полученных для различных образцов двигателей. Диапазоны номеров образцов соответствовали следующим классам технического состояния электродвигателей: [1; 56] – исправный, [57; 160] – короткое замыкание обмотки, [161; 211] – короткое замыкание пластин коллектора, [212; 283] – обрыв секции якоря, [284; 293] – круговой огонь по коллектору.

Анализ значений величины $M(1; 64)$, в конечном счете, позволил выделять среди множества образцов ЭД два класса электродвигателей: «исправный», «круговой огонь по коллектору» (см. рис. 3.3). Правила для диагностики образцов ЭД этих категорий имеют следующий вид:

```
IF (  $M(1; 64) < 90$  )
  THEN «Исправен»
IF (  $M(1; 64) > 700$  )
  THEN «Круговой огонь по коллектору»
```

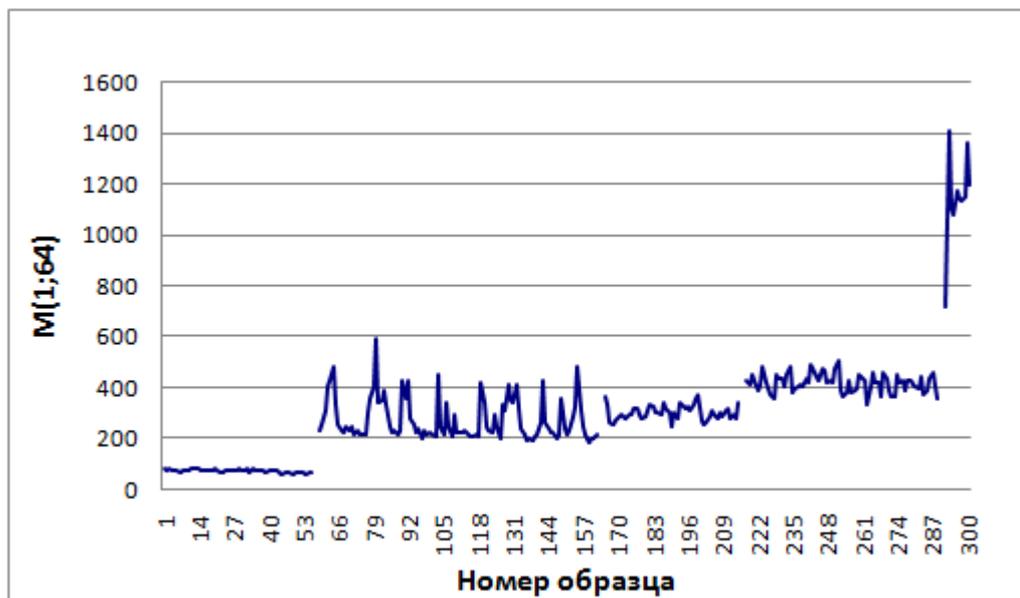


Рисунок 3.3 – Значения $M(1; 64)$ для различных образцов двигателей

Подобным образом выполненные исследования значений величины $M(26; 30)$ (см. рис. 3.4) дали возможность диагностировать электродвигатели со следующими видами неисправностей: «короткое замыкание обмотки», «короткое замыкание пластин коллектора» и «обрыв секции якоря». Представленные в удобной для изложения форме правила экспертной системы для выявления этих видов неисправностей имеют следующий вид:

```
IF ( [  $M(26; 30) > 600$  ] AND [  $M(26; 30) < 1000$  ] )
  THEN «Короткое замыкание обмотки»
IF ( [  $M(26; 30) > 30$  ] AND [  $M(26; 30) < 200$  ] )
  THEN «Короткое замыкание пластин коллектора»
IF ( [  $M(26; 30) \geq 200$  ] AND [  $M(26; 30) < 430$  ] )
  THEN «Обрыв секции якоря»
```

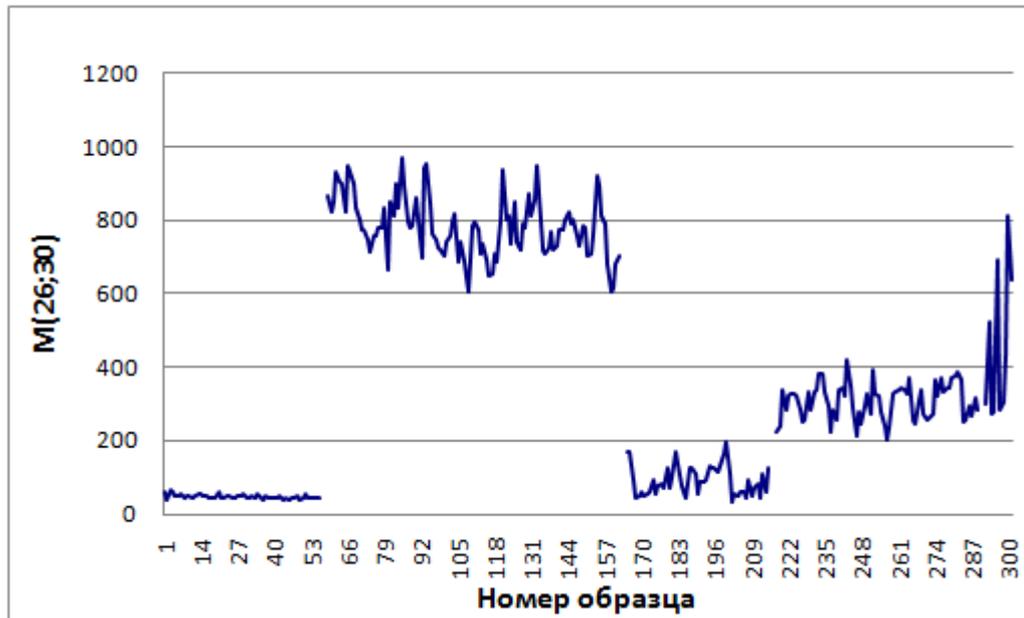


Рисунок 3.4 – Значения $M(26; 30)$ для различных образцов двигателей

Приведенная выше методика автоматизированной диагностики состояний ЭД модели МСП-0,25 средствами экспертной системы оказалась достаточно эффективной. С учетом некоторых опущенных здесь несущественных деталей формирования БП, представленная методика автоматизированной диагностики неисправностей ЭД позволила верно определить все типы неисправностей для каждого из имеющихся вариантов данных.

Развитие предложенного метода и автоматизированной системы диагностики электродвигателей выполняется за счет, в первую очередь, расширения экспериментальной базы – накопления сведений о неисправностях устройств и соответствующих спектрах рабочих токов двигателей. Далее, как теоретически, так и практически важное значение имеет переход к нечетким базам правил. Нечеткие БП используют методы нечеткого управления, в которых необходимо корректно формализовать условия типа « > 600 », « < 200 » и др. За счет этого достигается возможность расширения области применения экспертной системы диагностики, а также обнаружения одновременно нескольких видов неисправностей в ЭД, которые имеют место с различной степенью достоверности. Примеры функций принадлежности различных видов неисправностей для $M(26; 30)$ и $M(21; 25)$ представлены на рис. 3.5 и рис. 3.6 соответственно.

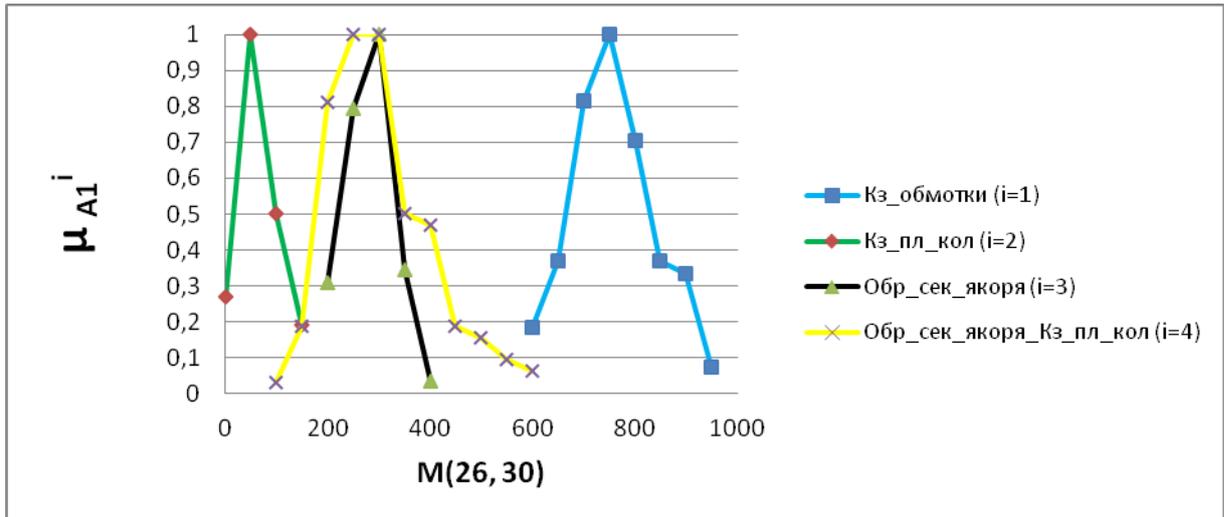


Рисунок 3.5 – Значения функций принадлежности различных видов неисправностей для $M(26; 30)$

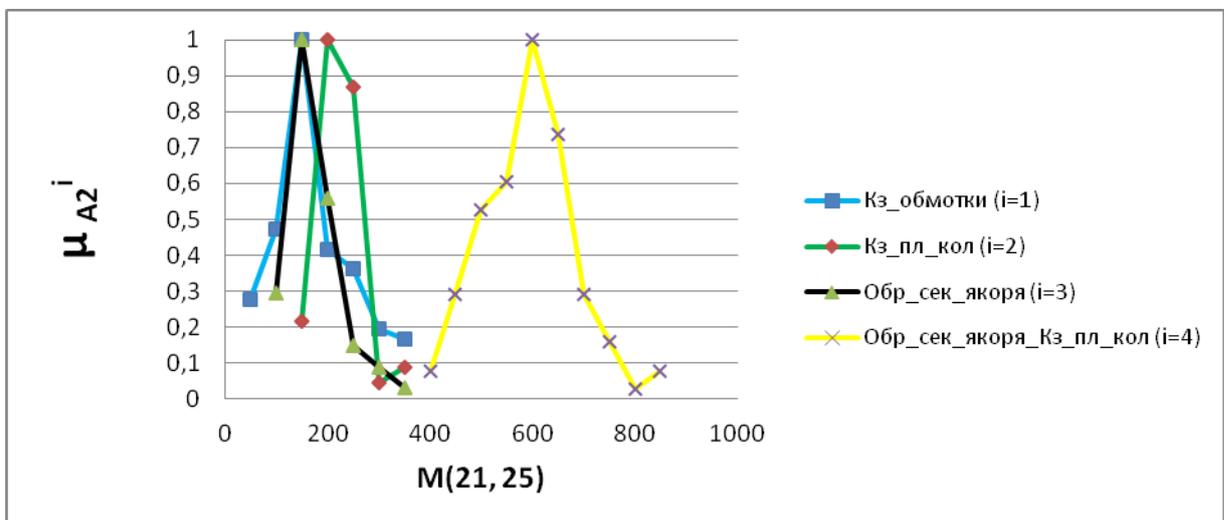


Рисунок 3.6 – Значения функций принадлежности различных видов неисправностей для $M(21; 25)$

Представленная автоматизированная ЭС диагностики электродвигателей постоянного тока в условиях их эксплуатации допускает адаптацию на основе обработки эксплуатационных данных. Она открывает возможности организации технического обслуживания ЭД «по текущему состоянию». За счет расширения базы правил экспертной системы возможна ее настройка для диагностики других видов неисправностей и типов электродвигателей [113].

3.3.2 Диагностирование состояний ЭД с использованием нечетких моделей

Представленная методика автоматизированной диагностики состояний ЭД модели МСП-0,25 средствами экспертной системы (см. п. 3.3.1), в целом, оказалась достаточно эффективной. Но предложенные правила частично «перекрываются», их формирование носит

эвристический характер, не определен механизм относительно возможности усовершенствования БП, например, при получении новых образцов поврежденных двигателей, либо при наличии у них нескольких неисправностей одновременно.

Эффективным методом относительно формализации причинно-следственных связей в задачах диагностики являются нечеткие отношения и композиционное правило вывода Заде [26, 79]. При построении моделей изучаемых процессов существенным является то, что задачи диагностики состояний объекта могут быть сведены к решению нечетких логических уравнений, связывающих функции принадлежности причин (диагнозов) и последствий (симптомов) [2, 43, 58]. Следующим шагом по формированию общих моделей диагностирования является предложенный в работах [26, 68] метод, который заключается в замене задачи решения системы нечетких логических уравнений задачей оптимизации соответствующего функционала. Эта задача в общем случае относится к классу NP-сложных [101]. Для решения таких задач оптимизации используются генетические алгоритмы [79, 114]. В работах [101, 79] также предлагается адаптивный подход к проектированию системы диагностики. Здесь строится и обучается специальная нейро-нечеткая сеть, которая является изоморфно логичным диагностическим уравнением.

Несмотря на довольно высокую сложность решения системы нечетких логических уравнений, представляющих задача диагностирования ЭД, будем применять для них методы экспертных систем, использующих нечеткие и нечетко-статистические базы знаний [26, 79, 86]. За счет этого достигается возможность расширения области применения экспертной системы диагностики, а также выявление одновременно нескольких видов повреждений в ЭД, которые имеют место с разной степенью достоверности. Процедуры метода нечетко-статистического управления приведены в [86].

Для реализации предложенных в работе методов и процедур моделирования и управления применены средства системы MATLAB [114]. Ее компонент Fuzzy Logic Toolbox поддерживает все фазы разработки нечетких систем. Функции пакета реализуют нечеткий логический вывод, кластеризацию и адаптивное нейро-нечеткое настраивание (ANFIS). Система позволяет модифицировать исходный код, создавать собственные функции принадлежности или процедуры дефазификации. Последнее является главным, поскольку среди существующих универсальных средств нечеткого моделирования отсутствуют такие, которые позволяют одновременно использовать различные категории неопределенности (статистическую, нечеткую др.). Особое внимание уделялось созданию адекватной системы нечетко-статистического и других форм вывода с многократной неопределенностью данных. Для этого были разработаны специализированные процедуры MATLAB. Библиотека специализированных функции являются основой для разработки программ моделирования процедур диагностирования электрических двигателей на

основе правил нечетких экспертных систем.

Реализацию нечетких процедур диагностирования электродвигателей демонстрируют следующие рисунки. Функция диагностирования состояния ЭД может принимать несколько значений, рис. 3.7: 1) KZobm – короткое замыкание обмотки, 2) KZkol – короткое замыкание пластин коллектора, 3) ObrYak – обрыв секции якоря.

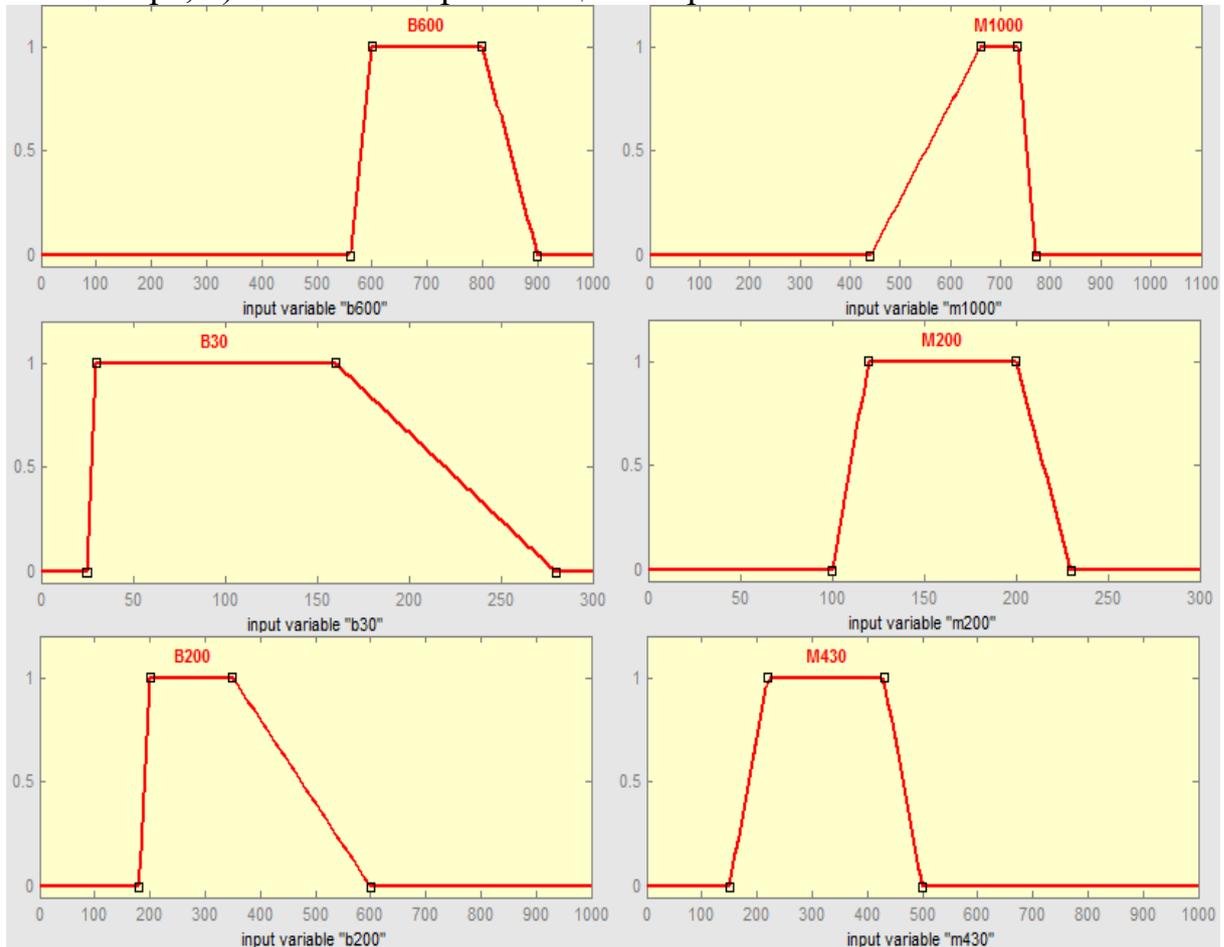


Рисунок 3.7 – Функции принадлежности входов системы диагностики, классы неисправностей электродвигателей

Рис. 3.8 показывает, что при входящем значении средней интенсивности «215», имеет место неисправность «Короткое замыкание пластин коллектора» со степенью достоверности 0.7. Заметим, что в детерминированном случае при выполнении правила

IF ([M(26; 30) >= 200] AND [M(26; 30) < 430])

THEN «Обрыв секции якоря»

результат диагностирования был бы другим. На рис. 3.8 видно, что такая возможность учтена и при методе нечеткого диагностирования, но с более низкой степенью достоверности. Результаты диагностирования зависят от моделей нечетких величин, которые в нашем случае представляют приближенные значения нечетких термов для величин интенсивности электрического тока M(26; 30): «Больше 30», «Меньше 200», «Больше = 200», «Меньше 430». За счет адаптации этих нечетких величин, в том числе на основе статистических данных [26, 79], обеспечивается

совершенствование экспертной системы автоматизированного диагностирования, а также возможность исследования других типов ЭД [16, 33].

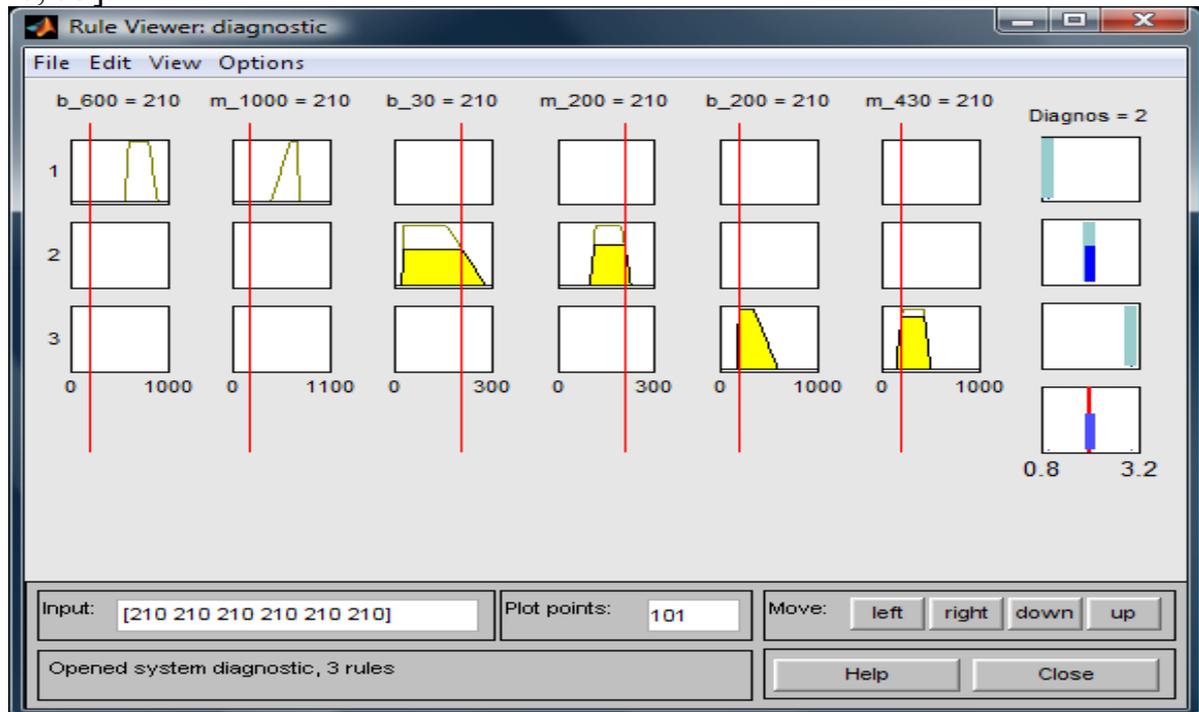


Рисунок 3.8 – Правила модифицированного вывода Такаги-Сугено

3.3.3 Задача выявления неисправностей в электродвигателях с использованием метода нечетко-статистического управления

Метод и информационные технологии нечетко-статистического управления предложены в [89]. Моделирование и регулирование сложных технологических процессов, для которых во многих случаях отсутствуют математические модели составляющих их объектов и общие законы управления, во многих случаях основывается на всестороннем анализе данных и результатов применения программно-целевого управления – мониторинге. Задача автоматизированного преобразования данных мониторинга в форму математических моделей анализа и управления, в данном случае на основе нечетких экспертных систем, представляет значительную научно-техническую проблему. Предлагаемый метод нечетко-статистического управления (НСУ) имеет целью объединить различные формы описания одного и того же процесса, характеризующие его нормативные (качественные, субъективные) и результирующие (эксплуатационные, фактические) параметры. Введение в модель задачи статистической информации, дополнительной по отношению к показателям степени принадлежности нечетких подмножеств, и представляющей некоторые другие свойства и особенности поведения исследуемых процессов, основывается, прежде всего, на различии между вероятностной и расплывчатой концепциями представления данных [11, 79]. Вероятность расплывчатого события может быть определена как

дополнительное свойство, чтобы получить более полное и точное описание исследуемого процесса.

Классический модуль нечеткого управления на основе обработки лингвистических моделей рассматриваемых процессов основан на правилах нечеткой импликации [8, 9], и состоит из следующих этапов [79]: оценка текущего состояния и «фазификация» входных данных (оценка степеней принадлежности, сопоставление нечетких подмножеств и входных данных), модификация нечетких переменных-заклучений для всех правил, формирование результирующих нечетких множеств (или же их суперпозиции), отображение результирующих нечетких множеств в единственное управляющее воздействие («дефазификация», «скаляризация»). Здесь на этапе выбора значения управляющего параметра могут быть использованы различные методы, в частности, методы центра тяжести, максимума функции принадлежности и др., представленные в [79, 116].

Для более полного понимания особенностей предлагаемого метода моделирования и выбора решений рассмотрим несколько содержательных постановок задач управления, условия осуществления и свойства решений которых характеризуются статистической и нечеткой информацией. Они имеют различную содержательную базу, но единую формальную структуру, традиционную для использования концепций нечеткого моделирования. Наряду с этим предполагается наличие данных о подобных ранее реализованных задачах, которые составляют дополнительный статистический базис, используемый далее для более обоснованного выбора управления.

Содержание задач по выбору управления () при неопределенности далее сводится к оценке необходимой величины некоторого ресурса, либо прогнозу ожидаемого времени выполнения задания при использовании нормативного ресурса. Управление зависит от двух характеристик:

объемного показателя () и удельной трудоемкости (). Объемный показатель, показатель трудоемкости, а также требуемый ресурс представляются в виде нечетких величин для двух возможных случаев выбора управлений – функционирования системы в условиях близких к

нормальным (), либо при функционировании с перегрузкой .

В качестве первого примера задачи выбора нечеткого управления рассматривается программная система по обработке сообщений от

множества абонентов. Здесь – средний объем поступающих за

некоторый период сообщений, – оценка их удельной трудоемкости (

сложность обработки отдельного сообщения), – планируемое время

обработки сообщений (предполагаемые затраты). Второй пример связан с

переработкой вагонов на станциях. В этой задаче – средняя степень

загрязнения вагонов после выгрузки, – оценка удельной трудоемкости (размеры и степень смерзания фрагментов и др.), – прогнозируемое время подготовки вагонов под погрузку. Представленные задачи выбора управления обладают рядом особенностей, из которых для нашего исследования наиболее существенными является очевидная невозможность задания точных значений параметров и , оценивающих условия задач по выбору управлений .

Содержательные основания для применения нечетко-статистического управления как при решении задач фазификации, так и при выборе результирующего воздействия, дефазификации, позволяют определить НСУ следующим образом, модифицирующим классическое нечеткое управление [79, 116] с учетом статистической неоднородности процессов. Информационная технология нечетко-статистического управления состоит в автоматизированном моделировании величин, входящих в

производственные модели . При этом накопление статистической информации является и формой адаптации базы правил управления. Для автоматизированного формирования нечеткого базиса НСУ могут использоваться разнообразные методы построения функций принадлежности, в частности метод Р. Р. Ягера [116]. Метод и информационная технология НСУ являются эффективной формой адаптивного моделирования и управления по данным наблюдений для сложных динамических процессов и объектов.

3.3.4 Диагностирование ЭД по данным частотного спектра на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил

Задача диагностики ЭД является частным примером задачи классификации объектов. В данном подразделе представлена экспертная система (ЭС) классификации объектов по данным их частотного спектра. Основой ЭС является база нечетко-статистических правил (БНСП) [89] и метод нечеткого управления [79]. Нечеткая компонента БНСП отражает субъективные знания эксперта о частотном спектре объектов. Статистическая составляющая БНСП отображает фактический частотный спектр эталонных объектов классификации и формируется автоматически в процессе адаптации ЭС [67].

Пусть задано множество исследуемых объектов и множество классов исследуемых объектов . Предлагаемая ЭС определяет степени принадлежности объекта к каждому из классов.

Обозначим через степень принадлежности объекта классу . Для формирования базы нечетких правил используется множество

обучающих объектов . Объект может быть использован в качестве обучающего объекта , если эксперт установил его степень принадлежности к одному из классов равной единице,

а к остальным классам – ноль: . Принадлежность обучающего объекта к классу обозначим через .

На рис. 3.9 представлена структура экспертной системы нечетко-статистической классификации объектов по частотному спектру.

Рисунок 3.9 – Структура экспертной системы классификации объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил

Снятый с объекта сигнал подается на АЦП для дискретизации. Частотный спектр сигнала объекта получается посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ) [59]. Результатом БПФ является

представление объекта множеством гармоник

преобразования Фурье. Частотное разрешение гармоник при этом

составляет Гц, где – максимальная частота спектра

дискретизированного сигнала исследуемого объекта. Частота гармоник

равна Гц. Каждая гармоника в множестве

представляется парой коэффициентов . Для каждой

гармоники преобразования Фурье вычисляется интенсивность частоты согласно (2.5).

Для построения базы правил ЭС был использован метод нечеткого управления Такаги-Сугено [79] и метод нечетко-статистического управления (НСУ) [89]. В рамках метода НСУ для вычисления принадлежности входной величины нечеткому множеству используется функция плотности , построенная на основе обработки статистических данных входной величины.

Для каждого класса существует свое правило, определяющее степень принадлежности объекта к классу . Правила представлены в следующем виде:

(3.3)

где μ_i – нечеткое множество интенсивности i -ой гармоники 1-го класса объектов, представленное функцией принадлежности $\mu_{i,j}$ и функцией плотности $\mu_{i,j}$ (3.6);

– функция вычисления значения степени принадлежности объекта к классу C_j .

Для формирования БНСП необходимо задать функции $\mu_{i,j}$ и $\mu_{i,j}$. Функции $\mu_{i,j}$ определяются экспертом субъективно на основании его знаний о частотном спектре исследуемых объектов. Для определения функций $\mu_{i,j}$ ЭС должна быть обучена на множестве обучающих объектов X . Частотный спектр каждого обучающего объекта представляется множеством интенсивностей гармоник $\mu_{i,j}$. Диапазон фактических значений $\mu_{i,j}$ разбивается на M равных интервалов. Каждый обучающий объект X_j принадлежит некоторому классу объектов C_j . В свою очередь, каждому C_j соответствует свое значение числа интервалов M_j . Шаг разбиения значений i -ой интенсивности гармоник $\mu_{i,j}$ для класса объектов C_j обозначим $\Delta_{i,j}$ и будем вычислять согласно

(3.4)

Обозначим через $\mu_{i,j}$ q -ый интервал значений i -ой гармоники 1-го класса объектов согласно

(3.5)

Плотность значений i -ой гармоники класса задается при помощи функции плотности , где – величина интенсивности i -ой гармоники объекта . Форма функции задается в процессе «обучения» экспертной системы на множестве . Значения функции определяются следующим образом:

(3.6)

где выбирается из условия ;

– функция принадлежности интенсивности к интервалу .
определяется согласно

(3.7)

На вход блока вывода подается множество интенсивностей гармоник объекта . Процесс вывода использует базу нечетких правил (3.3), что позволяет учитывать как субъективную экспертную оценку (функции) так и накопленные в процессе обучения ЭС данные статистики (функции). Степень принадлежности i -ой гармоники объекта 1-му классу определяется при вычислении значений функций принадлежности

и функций плотности

Задачей блока классификации является вычисление значений степеней принадлежности объекта к каждому из классов . В качестве входных данных для этого используются множества значений

и . При вычислении также используется множество

, где – значение центра интенсивности i -ой гармоники 1-го класса объектов, вычисленное согласно

(3.8)

где значение α выбирается из условия $\sum_{i=1}^n \mu_i = 1$. Значения степеней принадлежности μ_i вычисляются согласно

(3.9)

Представленная ЭС классификации объектов по частотному спектру на основе адаптивной БНСП была использована для разработки программно-аппаратного комплекса диагностики электродвигателей [22, 94]. Проводилась диагностика ЭД постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов моделей ДП-0,18, ДП-0,25, МСП-0,15 и МСП-0,25. В работе [90] были исследованы альтернативные подходы к решению задачи диагностики электродвигателей методами нейронно-сетевое моделирования.

Задача выявления неисправностей в различных моделях ЭД стрелочных переводов потребовала создания отдельной БНСП для каждой из моделей. Разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять групповую диагностику множества ЭД заданной модели, используя wav-файлы рабочего тока исследуемых двигателей. Для этого пользователь должен задать модель ЭД и путь к папке, содержащей wav-файлы. Модуль диагностики ЭД разработан на базе платформы Microsoft .NET Framework [122] с использованием языка C# [121, 123]. Внешний вид окна разработанного приложения и пример результатов диагностики ЭД постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов модели МСП-0,25 по станции Днепропетровск представлены на рис. 3.10.

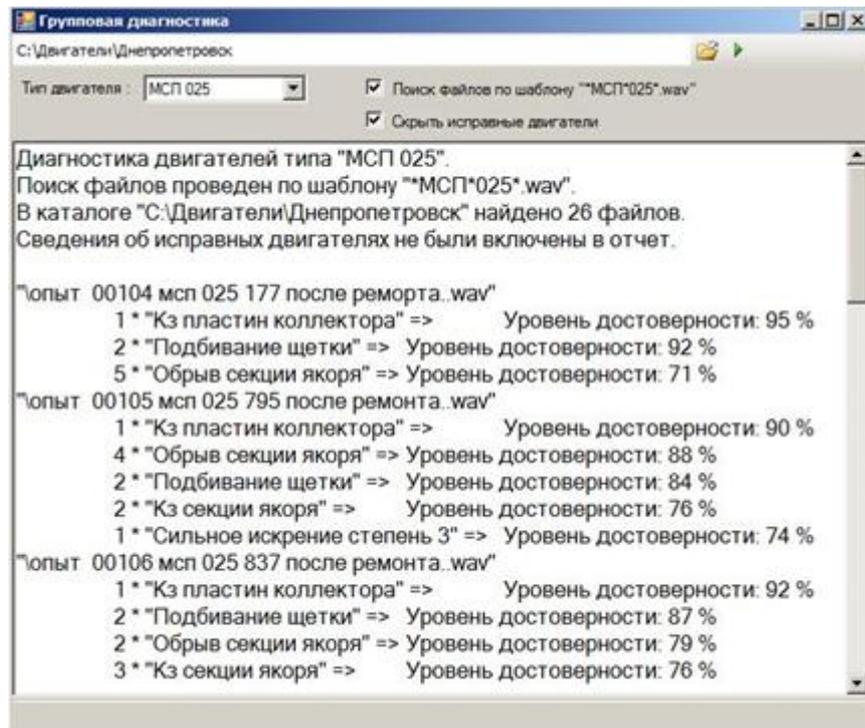


Рисунок 3.10 – Окно модуля групповой диагностики электродвигателей

Использование ЭС нечетко-статистической классификации по частотному спектру для решения задачи диагностики электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов позволяет обнаруживать одновременно нескольких видов неисправностей в ЭД, которые имеют место с различной степенью принадлежности. Диагностика ЭД производится в режиме рабочей нагрузки.

Разработанная экспертная система классификации объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил послужила основой для создания программного модуля диагностирования электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов (приложение В).

Выводы

Предложенные в разделе методы автоматизированной диагностики электродвигателей обладают рядом преимуществ по сравнению с уже существующими методами. К преимуществам могут быть отнесены обнаружение большего количества неисправностей, диагностика в режиме рабочей нагрузки, мониторинг технического состояния двигателя, автоматизированная настройка системы на распознавание новых видов неисправностей и новых типов двигателей.

Многочисленные эксперименты с искусственными нейронными сетями показали перспективность их использования для решения задачи определения технического состояния электродвигателей. Искусственные нейронные сети позволяют выявлять неисправности в электродвигателях на основе анализа дискретизированного рабочего тока двигателя. Однако,

использование данных спектрального разложения рабочего тока двигателя позволяет улучшить качество классификации и уменьшить размер нейросети.

Наилучшие результаты при выявлении неисправностей электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов показали искусственные нейронные сети типа многослойный персептрон. Эксперименты с нейронными сетями типа радиальная базисная функция показали, что даже при значительном количестве элементов в скрытом слое сети число правильно классифицированных образцов было крайне мало. Использование сетей Кохонена перспективно для анализа экспертом схожести различных видов известных и обнаружения новых неисправностей.

Разработана экспертная система классификации объектов по данным их частотного спектра. Система основана на базе нечетко-статистических правил и методе нечеткого управления. Нечетко-статистическая модель объекта позволяет комбинировать данные опыта и знания эксперта для классификации объектов. Нечеткая составляющая отражает знания эксперта, а статистическая – данные о фактическом состоянии объектов. Автоматизированная адаптация базы правил ЭС осуществляется в процессе ее обучения на множестве эталонных объектов. Работоспособность ЭС подтверждена при решении задачи диагностики электродвигателей.

Материалы раздела опубликованы в работах [90, 104, 105, 106, 107, 112].

РАЗДЕЛ 4

РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ПАРКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТРЕЛОЧНЫХ ПРИВОДОВ ПО ТЕКУЩЕМУ СОСТОЯНИЮ

4.1 Проблема автоматизированного управления техническими системами парка электродвигателей «по текущему состоянию»

Проблема эффективной эксплуатации технических систем на основе оценки их текущего состояния, в том числе многочисленных высокоответственных систем железнодорожного транспорта, была и остается в центре внимания научных и производственных исследований и разработок [26, 79]. Решению задач в области создания соответствующих методов и автоматизированных систем, а также их средств по обеспечению решения частных подзадач, ориентированных на конкретные объекты управления, посвящены многочисленные работы [101, 90]. Отметим актуальность и сложность реализации даже частных задач проблемы эксплуатации «парков» технических систем «по текущему состоянию» (ЭТС), например, таких как мониторинг, диагностика состояний объектов, выбор характеристик и отображение состояний парка и других, которые вместе с тем представляют общие как математические, так и организационно-технические задачи. В работе представлены результаты исследований по формированию системы математических моделей и соответствующих программно-технических средств, которые предназначены для обеспечения автоматизированной эксплуатации парка электродвигателей (ЭД) постоянного тока, которые широко используются в промышленности и на транспорте [111]. В нашем случае это двигатели модели МСП-0,25 железнодорожных стрелочных приводов, эксплуатируемые на Приднепровской железной дороге.

В работе [90] был предложен метод и информационная технология автоматизированной диагностики электродвигателей постоянного тока, как часть задачи управления парком ЭД по текущему состоянию, использующие модели искусственных нейронных сетей (ИНС). При этом было показано, что своевременная диагностика, обеспечивая выявление неисправностей задолго до полного отказа двигателя, позволяет значительно сократить расходы на их эксплуатацию и ремонт, дает возможность повысить безопасность использующих электродвигатели приводов. В основу информационной технологии диагностики парка ЭД железнодорожных стрелочных приводов положен мониторинг их технического состояния без извлечения из стрелочного привода [105]. Это обусловлено тем, что кабели, питающие стрелочные двигатели, сводятся в релейную комнату. Поэтому возможен постоянный контроль технического

состояния всех стрелочных электродвигателей при снятии кривых тока электродвигателя в релейной на станции. Преимущество системы автоматизированной диагностики [90] в том, что в ней производятся измерения характеристик двигателя, находящегося под воздействием номинальных, рабочих значений напряжений, токов, магнитных полей, центробежных сил и др. Такие измерения параметров ЭД позволяют выявлять больше неисправностей, чем при использовании статических методов диагностики [35].

Результаты [90] все же решают частную задачу и могут быть использованы как элемент автоматизированной системы ЭТС. Использование моделей диагностики на базе ИНС требует значительных наборов эталонных примеров, создания специальных процедур настройки и адаптации модели. В представленной работе получил развитие метод автоматизированной диагностики ЭД стрелочных переводов за счет использования моделей нечетких экспертных систем [26, 79]. Для реализации непосредственных процедур управления парком ЭД с учетом их технического состояния разработана двухуровневая система математических моделей, верхний уровень которой представляет некоторые контролируемые свойства парка технических систем в целом, а нижний – формируется из математических моделей отдельных объектов. Для реализации математических моделей каждого из уровней использованы нейро-сетевые методы в форме карт Кохонена [101]. Верхний уровень системы управления парком ЭД обеспечивает оценки его текущего состояний и прогнозирование значений параметров (ожидаемое время до проявления неисправности, необходимые затраты на восстановление и т.п.), а модели нижнего уровня представляют эволюцию состояний конкретных ЭД. Для реализации моделей управления парком объектов были разработаны и модифицированы процедуры библиотеки MATLAB [114].

4.2 Разработка информационного обеспечения для автоматизации процессов эксплуатации парка электродвигателей на основе оценки их текущего состояния

Для автоматизации процессов эксплуатации парка ЭД в качестве базовых выбраны процедуры мониторинга состояний технических систем, а также их диагностики. Целью процедур мониторинга является сбор оперативных данных о каждой технической системе, что на практике должно выполняться при снятии кривых тока электродвигателей в релейной. Получаемые при этом данные подвергаются преобразованию и первичному анализу, а затем передаются в информационные базы данных и используются для анализа, моделирования, диагностики, а также решения других задач эксплуатации парка ЭД.

При диагностике устанавливались четыре класса технического состояния электродвигателя: исправен, короткое замыкание обмотки, короткое замыкание пластин коллектора, обрыв секции якоря. Для получения частотного спектра рабочий ток электродвигателя преобразовывался в форму импульсно-кодовой модуляции. При преобразовании аналогового сигнала использовалась частота дискретизации равная 11025 герц, разрядность выборки составляла 16 бит. Частотный спектр тока двигателя определялся посредством быстрого преобразования Фурье [59]. Полученная последовательность дискретных значений записывалась в wav-файлы, соответствующие стандарту файлов uncompressed Microsoft PCM audio.

При формировании обучающих данных использовались электродвигатели, принадлежащие ко всем четырем классам неисправностей. Причем техническое состояние каждого двигателя устанавливалось путем экспертных оценок [90]. Алгоритмы выявления неисправностей в ЭД основаны на сравнении спектра тока диагностируемого двигателя со спектрами тока эталонных двигателей.

Установлено [90], что возникновение каждого вида неисправности приводит к появлению в спектре тока двигателя новых гармоник определенной частоты и интенсивности.

Спектры токов двигателей, соответствующие различным классам технического состояния ЭД («исправный», «короткое замыкание обмотки», «короткое замыкание пластин коллектора», «обрыв секции якоря», «круговой огонь по коллектору»), представлены на рис. 4.1. На оси абсцисс указаны номера гармоник спектрального разложения рабочего тока электродвигателя, а по оси ординат отмечены интенсивности этих гармоник. Анализ рисунков показывает, что для выявления неисправностей в электродвигателях постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов достаточно анализировать, только нижние гармоники спектрального разложения рабочего тока ЭД, интенсивность высокочастотных гармоник спектра близка к нулю.

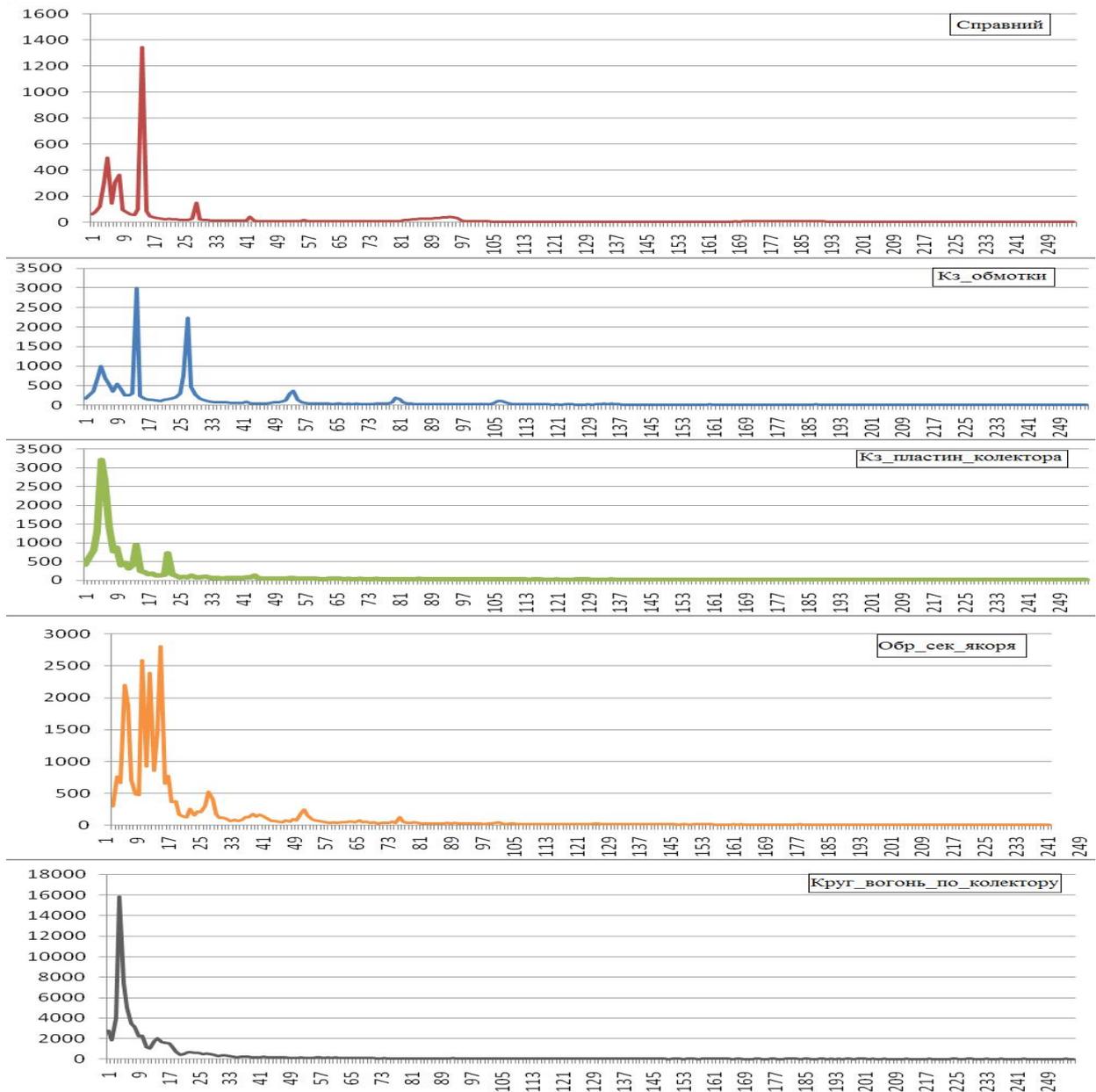


Рисунок 4.1 – Спектры токов эталонных электродвигателей (256 интенсивностей гармоник)

Для формирования представительных параметров спектров были исследованы средние арифметические значения интенсивностей гармоник различных образцов электродвигателей. Анализ показал, что достаточно рассматривать спектры токов двигателей лишь для 30 гармоник, дальнейшие гармоники не имеют особенностей поведения, которые позволяют отличить одно состояние ЭД от другого. Вид спектров тока с 30 гармониками для разных состояний приведены на рис. 4.2.

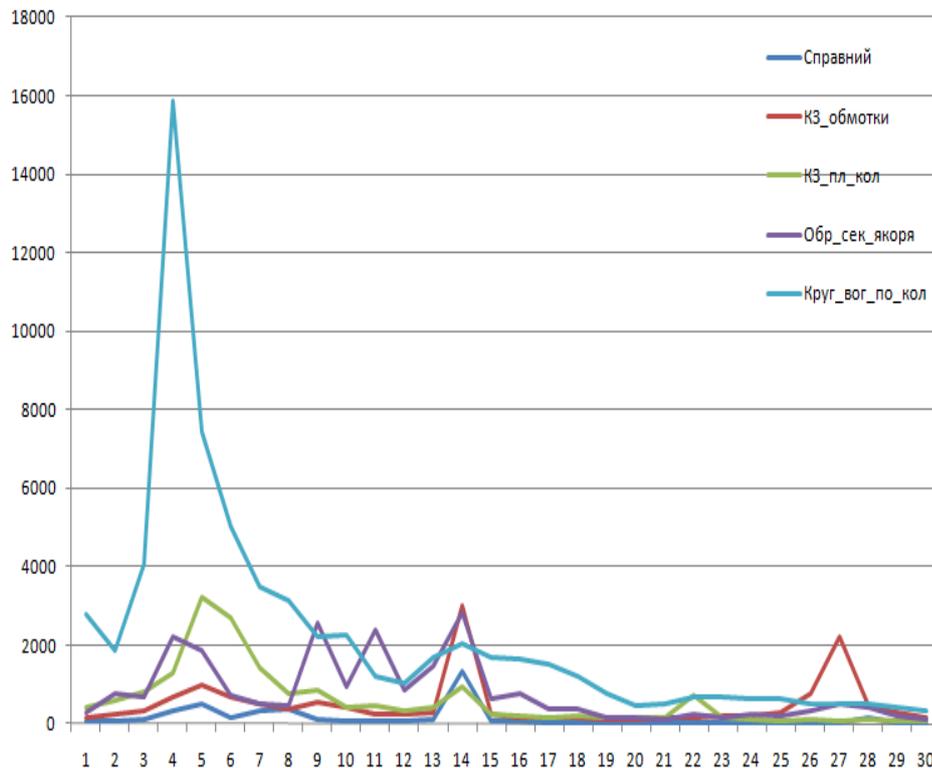


Рисунок 4.2 – Спектры токов эталонных электродвигателей для выделенного диапазона частот

4.3 Планирование процессов эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов на основе модели парка и индивидуальных моделей электродвигателей по текущему состоянию

Совершенствование эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов является сложной и многосторонней задачей, решение которой состоит из множества подзадач [109].

В настоящее время эксплуатация парков ЭД стрелочных переводов в Украине проводится на основе планово-предупредительного метода. При использовании этого метода замена электродвигателей стрелок производится согласно периодичности, установленной Инструкцией ЦШУ [35], что ведет к нежелательному преждевременному капитальному ремонту при неиспользованном техническом ресурсе двигателя. Предлагаемая в работе технология эксплуатации ЭД позволяет оценить текущее состояние двигателя и проводить ремонт двигателя после фактического использования технического ресурса.

Одной из подзадач эксплуатации парков ЭД железнодорожных стрелочных переводов является задача определения очередности ремонтов электродвигателей [85]. Задача планирования процессов эксплуатации может быть представлена как определение очередности ремонтов ЭД, она возникает в случае, когда ресурсы, необходимые для проведения ремонтных работ ограничены. К таким ограниченным ресурсам можно отнести персонал, запасные части, денежные средства, ... При

ограниченных ресурсах, необходимых для ремонта, и большом числе неисправных электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов необходимо принять решение об очередности ремонта ЭД. Некоторые электродвигатели следует ремонтировать в первую очередь, восстановление других ЭД может быть отложено до момента поступления необходимых для ремонта ресурсов.

В работе для определения очередности ремонта электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов предложен показатель и соответствующий критерий, который получил название «стоимость отказа электродвигателя». Стоимость отказа электродвигателя железнодорожного стрелочного перевода (СОЭ) C определяется в следующем виде:

(4.1)

где R – стоимость ремонта электродвигателя;
 F – прогнозируемая стоимость ремонта электродвигателя;
 Z – издержки, вызванные задержкой поездов в случае отказа электродвигателя и прекращения работы стрелочного перевода.

В простейшем случае стоимость отказа электродвигателя железнодорожного стрелочного перевода C может быть оценена как

(4.2)

Если в качестве значения берется оценка вероятности неисправности и предполагается, что возникающие в электродвигателе неисправности являются независимыми событиями, то оценку ожидаемой стоимости ремонта электродвигателя R представим следующим образом:

(4.3)

где p_i – достоверность i -ой неисправности, C_i – стоимость ремонта i -ой неисправности;
 N – число неисправностей, выявляемых системой диагностики электродвигателей.

В разработанной информационной технологии автоматизированной эксплуатации парка ЭД значение достоверности i -ой неисправности вычисляется системой диагностики электродвигателей по текущему

состоянию ЭД. В частности, если для выявления неисправностей в электродвигателях используются искусственные нейронные сети, то значение достоверности i -ой неисправности определяется значением нейрона выходного слоя многослойного персептрона. Каждый нейрон выходного слоя вычисляет достоверность заданной неисправности (см. 3.2). Если для выявления неисправностей в электродвигателях используется экспертная система классификации объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил, то значение достоверности i -ой неисправности определяется согласно (3.9).

Прогнозируемая стоимость ремонта электродвигателя F вычисляется как

$$(4.4)$$

где прогнозируемое значение достоверности i -ой неисправности,

Как известно, электродвигатель железнодорожного стрелочного перевода способен работать при наличии в нем некоторых неисправностей [74]. Чем дольше ЭД работает с неисправностью, тем более отчетливо проявляются в нем неисправности и тем дороже обойдется восстановление двигателя.

Предлагаемая автоматизированная система эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов (рис. 2.1) основана на анализе значений достоверностей неисправностей, которые вычисляются модулем диагностирования электродвигателей. Модуль мониторинга ЭД осуществляет постоянный контроль технического состояния электродвигателей. Этот контроль в нашем случае реализуется следующим образом. Каждый ЭД имеет соответствующую ему индивидуальную модель двигателя, которая хранит спектральные характеристики исправного состояния двигателя. Спектральные характеристики исправного состояния ЭД получают после установки исправного двигателя в стрелочный привод и запуска ЭД на перевод стрелки в условиях рабочей нагрузки. Модуль мониторинга сравнивает спектр рабочего тока электродвигателя со спектром исправного состояния из соответствующей ИМД. При этом оценка текущего технического состояния ЭД происходит без его извлечения из стрелочного привода (оценка «по текущему состоянию»). При обнаружении существенных различий между спектром исправного состояния и текущим спектром рабочего тока ЭД модуль мониторинга передает спектральные характеристики анализируемого ЭД в модуль диагностирования.

Мониторинг технического состояния конкретного двигателя позволяет получить временной ряд оценок достоверностей для каждой i -ой неисправности :

(4.5)

При работе электродвигателя его детали стареют и изнашиваются, поэтому можно предположить, что с течением времени каждое последующее значение достоверности i -ой неисправности временного ряда (4.5) будет не меньше предыдущего :

(4.6)

При вычислении прогнозируемой стоимости ремонта электродвигателя F (4.4) необходимо для каждой достоверности i -ой неисправности спрогнозировать значение на основе данных временного ряда (4.5), соответствующего i -ой неисправности.

Для нахождения оценок спрогнозированных значений можно воспользоваться классическими методами экстраполяции, в простейшем случае в работе использована параболическая экстраполяция.

Издержки Z , вызванные задержкой поездов в случае отказа электродвигателя и прекращения работы стрелочного перевода, могут быть оценены как

(4.7)

где λ – среднее число поездов, проходящих через стрелочный перевод в час;

- время, необходимое для возобновления работы стрелочного перевода;
- стоимость задержки одного поезда на один час;
- вероятность отказа стрелочного перевода.

В простейшем случае, если не учитывать взаимные влияния различных типов неисправностей ЭД, вероятность отказа стрелочного перевода может быть оценена на основании достоверностей неисправностей электродвигателя стрелочного перевода согласно

(4.8)

Технология эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов по текущему техническому состоянию основана на использовании модели парка двигателей и индивидуальных моделей двигателей. Модель парка электродвигателей позволяет определять текущее техническое состояние двигателей, выявлять скрытые в них неисправности и получать оценку стоимости ремонта электродвигателя согласно (4.3). Индивидуальные модели электродвигателей позволяют предсказать техническое состояние двигателей и получать оценку прогнозируемой стоимости ремонта электродвигателя согласно (4.4).

4.4 Разработка двухуровневой нейронно-сетевой модели процессов эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов по текущему состоянию

Рассмотрим задачу автоматизации управления процессом эксплуатации парка ЭД с контролируруемыми текущими состояниями на основе построения двухуровневой нейронно-сетевой модели (карты Кохонена [101]), в которой мониторинг состояний ЭД и анализа их динамики реализуется в рамках индивидуальной модели двигателя (ИМД). Сущность предлагаемой модели управления эксплуатацией парка ЭД заключается в объединении индивидуальной модели изменения состояний ЭД с моделью парка [56, 57]. Одновременно с использованием модели парка (МП) контролируются возможные изменения текущего состояния ЭД, отражающие соответствующие различные типы неисправностей. В качестве исходных используются эксплуатационные данные всего парка ЭД – гармоники определенной частоты и интенсивности в спектре тока для электродвигателей с ранее обнаруженными состояниями (образцы), а также соответствующие параметры исследуемого электродвигателя.

Для решения задачи по эксплуатационным данным (токи ЭД) была построена МП возможных состояний электродвигателей в форме Карты Кохонена. При обучении (10000 эпох) использовались представители ЭД со следующими контролируруемыми состояниями:

- И (исправен), 25 двигателей (1-25);
- КЗО (короткое замыкание обмотки), 20 двигателей (26-45);
- КЗПК (короткое замыкание пластин коллектора), 15 двигателей (46-60);
- ОСЯ (обрыв секции якоря), 30 двигателей (61-90);
- КПК (круговой огонь по коллектору), 10 двигателей (91-100).

В модели реализован механизм «раскраски» узлов в соответствии с заданными признаками объектов, которые исследуются при анализе совокупности данных. После раскрашивания получают зоны модели, которые соответствуют заданным цветным «признакам типа узлов». При анализе новых данных, или новых ЭД, попадание параметров некоторого объекта при классификации на основе карты Кохонена в определенную зону говорит о его ожидаемых свойствах. За счет построения модели статистических данных как карты признаков Кохонена, а также имея информацию о части исследуемых объектов, можно достаточно достоверно прогнозировать поведение других объектов [101].

На рис. 4.3 изображена карта Кохонена общей модели состояний электродвигателей. Малые шестиугольники – нейроны карты Кохонена, а цвет больших – отображает близость групп объектов. Чем темнее цвет шестиугольника – тем сильнее отличаются объекты кластеров.

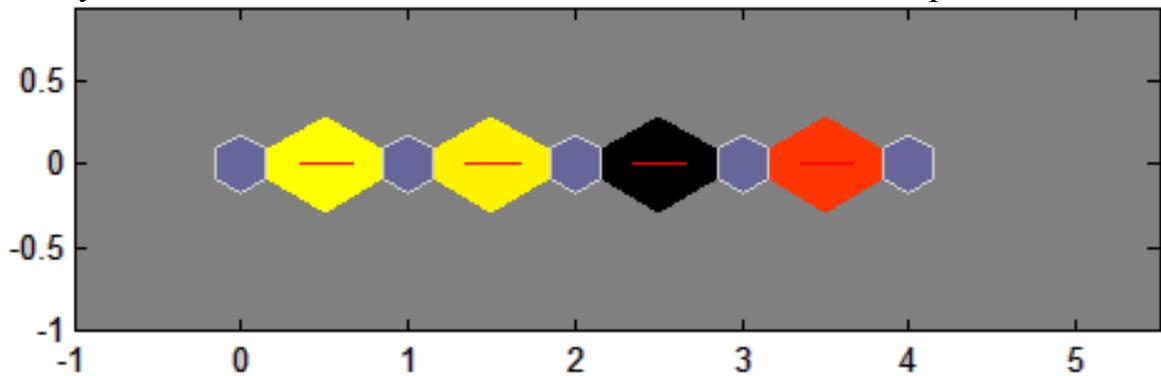


Рисунок 4.3 – Карта Кохонена модели парка ЭД по исследованию мощности связей между группами

Рис. 4.4 демонстрирует пример распределения двигателей, показатели которых использовались для обучения карты Кохонена общей модели, в кластерах.

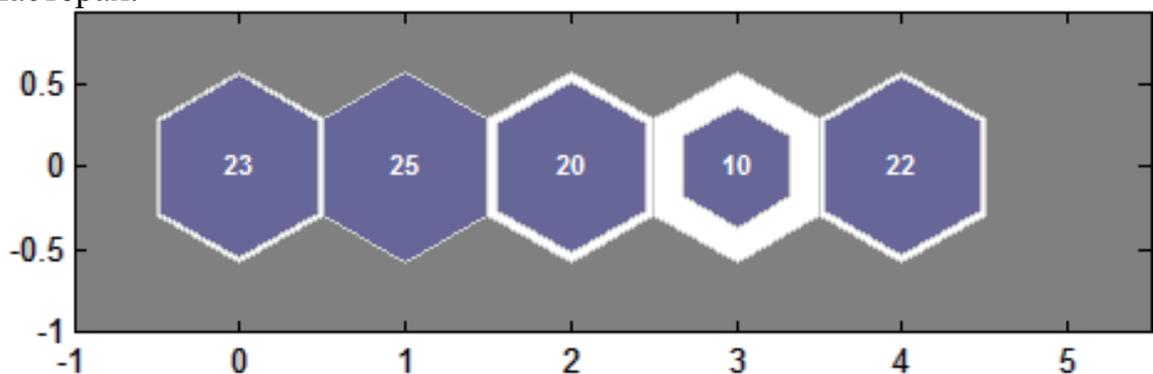


Рисунок 4.4 – Распределение эталонных двигателей в кластерах модели парка

Можно сделать вывод (см. табл. 4.1), что эталонные двигатели также несут в себе несколько потенциальных (или уже обнаруженных) неисправностей (состояний). Полностью различаются двигатели в исправном состоянии и те, что имеют короткое замыкание обмотки. Строятся также карты Кохонена для отдельных электродвигателей,

используя их эксплуатационные данные (табл. 4.2). На рис. 4.5, рис. 4.6 приведены примеры моделей ЭД нижнего уровня, представляющих динамику изменения состояний устройств при эксплуатации.

Таблица 4.1 – Распределение элементов в кластерах модели состояний парка электродвигателей

№ кл.	Номера элементов	Название состояния
1	46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 91 93 94 95 96 97 99 100	КЗПК, КПК
2	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25	Исправный
3	26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45	КЗО
4	64 65 66 67 74 75 76 82 84 85	ОСЯ
5	61 62 63 68 69 70 71 72 73 77 78 79 80 81 83 86 87 88 89 90 92 98	ОСЯ, КПК

Таблица 4.2 – Распределение элементов индивидуальной модели ЭД

№ кл. ИМД	Номера элементов	№ кл. МП
1	16 19 20	3
2	17 18	3
3	–	
4	2 5 6 9 11 12 13 14 15	2
5	1 3 4 7 8 10	2

В табл. 4.2 указаны данные, характеризующие распределение состояний ЭД в кластерах, согласно рис. 4.6.

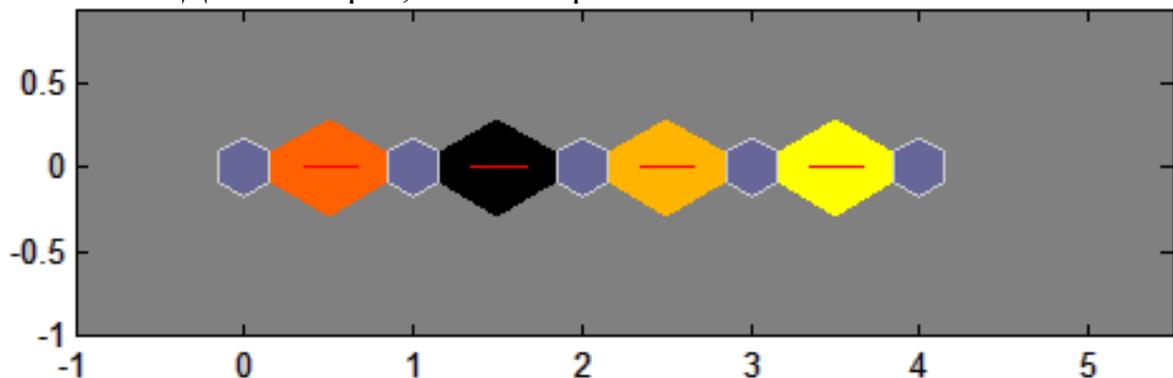


Рисунок 4.5 – Карта Кохонена мощности связей между кластерами ИМД

Приведенные в табл. 4.2 данные показывают, что наблюдается динамика состояний электродвигателя: первые измерения (1-15) указывают на исправное состояние, последние (16-20) уже указывают на состояние «короткое замыкание обмотки».

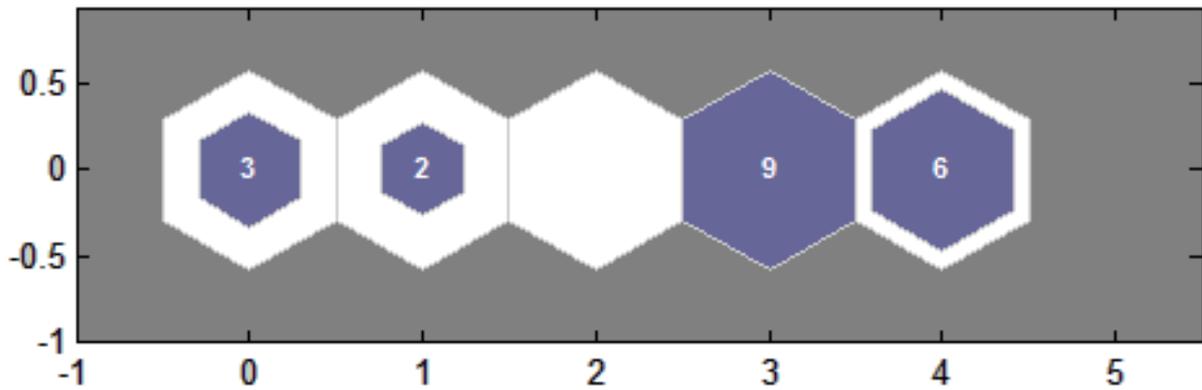


Рисунок 4.6 – Распределение измерений состояний двигателя в кластерах индивидуальной модели

Применяя разработанные функции библиотеки MATLAB, выполним анализ связи индивидуальной и общей моделей, совместно обеспечивающих процессы эксплуатации парка ЭД. Согласно табл. 4.3 исходное состояние некоторого рассматриваемого двигателя является исправным, но постепенно параметры состояния приближаются к короткому замыканию обмотки. Наилучший показатель исправности наблюдается в кластере 4 индивидуальной модели состояний, дальше он ухудшается в кластере 5 (увеличивается минимальное отклонение от кластера общей модели состояний, соответствующего исправному состоянию). Кластеры 1 и 2 индивидуальной модели уже соответствуют короткому замыканию обмотки.

Таблица 4.3 – Анализ кластеров ИМД по отношению к модели парка ЭД

№кл.ИМ	Отклонение					Мин. отклонение	№ кл.ОМ
1	1.6752	1.4667	0.7626	1.1863	1.7142	0.7626	3
2	1.3681	1.0484	0.6194	1.0211	1.3564	0.6194	3
3							
4	1.0170	0.2573	1.0024	1.0388	1.0002	0.2573	2
5	1.0039	0.3165	1.0353	1.0523	1.0086	0.3165	2

Таким образом, второй кластер индивидуальной модели ЭД является наиболее приближенным к состоянию короткого замыкания обмотки.

Рис. 4.7, рис. 4.8, отражают динамику изменения состояния исследуемого электродвигателя, а рис. 4.9 – представляет пример отображения динамики состояний парка ЭД, построенный с использованием разработанных дополнительных функций MATLAB.

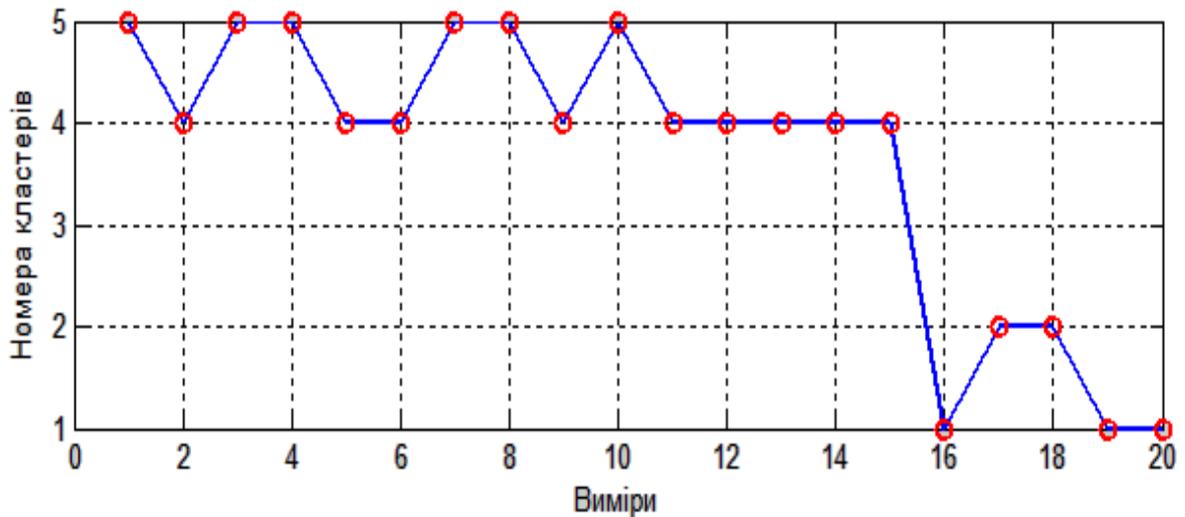


Рисунок 4.7 – Представление процесса эксплуатации ЭД как перемещения состояний по кластерам ИМД

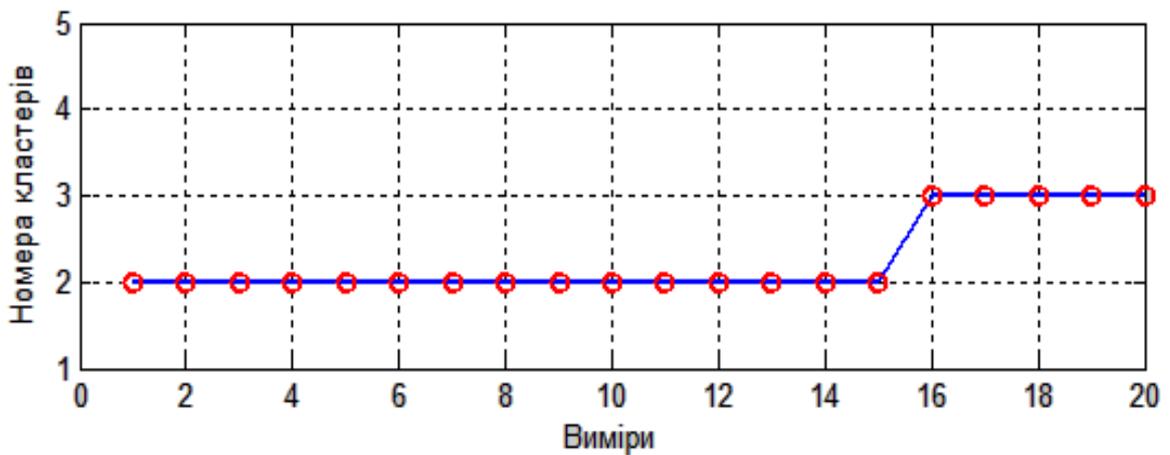


Рисунок 4.8 – Перемещение состояний ЭД по кластерам МП со временем

Согласно рис. 4.9 в шестиугольниках карты Кохонена указано распределение двигателей на данный момент (23, 22, 23, 10, 22), сверху, в желтых прямоугольниках, – предварительное распределение (23, 25, 20, 10, 22). Цвет шестиугольника определяется следующим образом. Если произошло изменение количества элементов в кластере – цвет зеленый, а если число элементов превышает некоторое заданное число (здесь – 22) – цвет красный, иначе цвет является стандартным, синим.

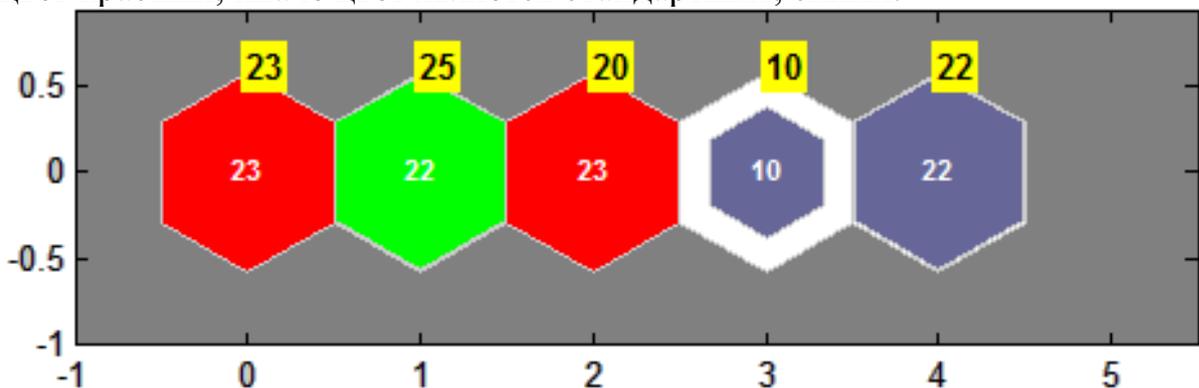


Рисунок 4.9 – Отображение динамики состояний парка электродвигателей стрелочных приводов

Такой анализ (см. рис. 4.9) позволит эффективно осуществлять мониторинг за состоянием парка ЭД при его эксплуатации, своевременно устанавливая потребности в осуществлении ремонтов или обновлении парка технических систем.

Выводы

Разработаны методы и средства, предназначенные для автоматизации управления процессами эксплуатации парка электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов по оценкам их текущего состояния без извлечения двигателя из привода.

Представлена многоуровневая модель для управления эксплуатацией парка электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов по текущему состоянию, сформированная с использованием карт Кохонена. Мониторинг состояний электродвигателя и анализ их динамики реализуется в рамках индивидуальной модели двигателя. Одновременно с использованием модели парка контролируются состояния, соответствующие возникновению различных типов неисправностей.

При управлении парком решается одна из основных подзадач эксплуатации электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов – определение очередности ремонтов тех электродвигателей, при диагностике которых установлены различные скрытые типы неисправностей. Задача установления очередности ремонтов возникает при ограниченности ресурсов, к которым отнесены время ремонта, персонал, запасные части, денежные средства и др.

В работе для определения очередности ремонта электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов предложен показатель и соответствующий критерий, который получил название «стоимость отказа электродвигателя». Стоимость отказа электродвигателя железнодорожного стрелочного перевода определяется на основании трех величин: стоимости ремонта электродвигателя, прогнозируемой стоимости ремонта электродвигателя и на основании оценки издержек, вызванных задержкой поездов в случае отказа электродвигателя и прекращения работы стрелочного перевода.

Оценка стоимости ремонта электродвигателя основана на анализе значений достоверностей неисправностей, которые вычисляются модулем диагностирования электродвигателей. Для получения значений достоверностей неисправностей используется экспертная система классификации объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил. Использование нечетко-статистических правил для определения технического состояния электродвигателя позволяет учитывать как знания эксперта, так и данные

статистики о частотных характеристиках тока двигателей.

Мониторинг технического состояния двигателя позволяет получить временной ряд оценок достоверностей для каждой неисправности. Этот временной ряд является основой для прогнозирования достоверности неисправностей. Прогнозированные достоверности неисправностей используются для расчета прогнозируемой стоимости ремонта электродвигателя.

Предложенная автоматизированная система эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов допускает адаптацию на основе обработки эксплуатационных данных.

Материалы раздела опубликованы в работах [REF _Ref302924986 \h 34, REF _Ref322699160 \h 85, 108, 109].

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе разработаны методы и средства, предназначенные для эффективной эксплуатации по текущему техническому состоянию парков электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов. При этом усовершенствованы методы диагностики ЭД СП, использующие модели ИС. Разработанные средства позволяют выявлять большее число неисправностей ЭД, чем методы, применяемые на железных дорогах Украины. Диагностика ЭД может проводиться как на стенде во время планового осмотра, так и без извлечения двигателя из стрелочного привода. Выполненные исследования и разработки позволяют перейти от планово-предупредительной замены двигателей к обслуживанию двигателей по их фактическому техническому состоянию. При этом осуществляется прогнозирование технического состояния двигателя.

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

- с использованием методов интеллектуальных систем и формированием индивидуальных моделей ЭД разработана автоматизированная технология эксплуатации парков электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов, которая использует спектральный анализ рабочего тока ЭД и учитывает его текущее состояние;
- получено новое решение задачи диагностирования электродвигателей средствами нечетко-статистических экспертных систем, которые учитывают как экспертную, так и статистическую информацию о процессах эксплуатации технических систем, повышая точность диагностирования состояний ЭД;
- сформулирована задача выбора оптимальной очередности ремонтов для парка электродвигателей стрелочных переводов, которая учитывает текущие и прогнозируемые технические состояния устройств, определенные по индивидуальным моделям процессов их эксплуатации;
- усовершенствованы модели искусственных нейронных сетей типа многослойный персептрон для диагностирования ЭД постоянного тока железнодорожных СП, что позволило повысить число выявляемых неисправностей;
- предложенные методики и технология дают возможность диагностировать электродвигатели железнодорожных стрелочных переводов без их извлечения из привода, а также реализовывать мониторинг технического состояния двигателей во время эксплуатации;
- на основе сетей Кохонена решена задача планирования эксплуатации парка электродвигателей, созданы многоуровневые нейронно-сетевые модели процессов эксплуатации парков электродвигателей постоянного тока по текущему техническому состоянию индивидуальных объектов;

– разработан и внедрен в эксплуатацию аппаратно-программный комплекс диагностики электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов, выявляющий неисправности в электродвигателях постоянного тока моделей ДП 0.18, ДП 0.25, МСП 0.15 и МСП 0.25.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для дальнейшего развития технологий эксплуатации парков электродвигателей стрелочных переводов на железных дорогах Украины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. с. 1796515 А1 СССР, МКИ В61L 7/08. Устройство для проверки стрелочных электроприводов / А. П. Разгонов, А. Н. Байдуж, В. Я. Кизяков, Н. В. Рудь, М. А. Ковригин. – заявл. 17.08.90; опубл. 23.02.93, Бюл. № 7.
2. Аверкин А. Н. Использование нечеткого отношения моделирования для экспертных систем / А. Н. Аверкин, А. И. Нгуен. – М. : ВЦ АН СССР, 1988. – 24 с.
3. Автоматизированная система измерения и контроля параметров электродвигателей постоянного тока стрелочных электроприводов / [Саидов С. А., Морозов О. Г., Палахов Н. А., Дорогов Н. В.] // Автоматика, телемеханика и связь. – 1996. – № 6. – С. 28–30.
4. Айфичер Э. С. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Эммануил С. Айфичер, Барри У. Джервис. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2008. – 992 с.
5. SEQ [* ARABIC 5. Аналіз експлуатаційної роботи господарств галузі автоматики, телемеханіки та зв'язку Укрзалізниці за 2011 рік. Міністерство інфраструктури України. Державна адміністрація залізничного транспорту. – 2012. – 62 с.
6. Бальтет Л. И. Устройство определения неисправности электродвигателей стрелочных электроприводов / Л. И. Бальтет // Автоматика, телемеханика и связь. – 1993. – № 3. – С. 4–11.
7. Барский А. Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А. Б. Барский. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 176 с.
8. Батыршин И. З. Методы представления и обработки нечеткой информации в интеллектуальных системах / И. З. Батыршин // Новости искусственного интеллекта. – 1996. – № 2. – С. 9–65.
9. Батыршин И. З. Общий взгляд на основные черты и направления развития нечеткой логики Л. Заде / И. З. Батыршин // Новости искусственного интеллекта. – 2001. – № 2–3. – С. 25–27.
10. Безрученко В. Н. Электрические машины / В. Н. Безрученко, А. С. Хотян. – К. : Высшая школа. Главное изд-во, 1987. – 215 с.
11. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Беллман Р., Заде Л. // Вопросы анализа и процедуры принятия решений: Пер. с англ. – М. : Мир, 1976. – С. 172–175.
12. Бессуднов Е. П. Обнаружение мест дефектов изоляции обмоток электрических машин постоянного тока / Бессуднов Е. П. – М. : Энергия, 1977. – 120 с.
13. SEQ [* ARABIC 13. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / Блейхут Р. ; пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 448 с.
14. Боднар Б. Є. Дослідження технічного стану вузлів локомотива з використанням нейронних мереж / Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, О. М. Швець // Проблемы и перспективы развития железнодорожного

- транспорта : 69 междунар. науч.-практ. конф., 21–22 мая 2009 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2009. – С. 8–9.
15. Боднар Б. Е. Применение нейронных сетей для определения технического состояния локомотивов / Б. Е. Боднар, А. Б. Очкасов, О. М. Швець // Локомотив-информ. – Харьков, 2009. – № 9–10. – С. 4–6.
 16. Боднар Б. Е. Удосконалення системи обліку інформації бортової системи діагностування електровозів ДЕ1 / Б. Е. Боднар, О. И. Гилевич, О. Б. Очкасов, О. М. Швець // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : междунар. науч.-практ. конф., 14–15 мая 2009 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2009. – С. 39.
 17. Босов А. А. Организация профилактики объектов железнодорожной автоматики с применением измерительного устройства / А. А. Босов, А. П. Разгонов, В. В. Холоша // Вестник ВНИИЖТ. – 1998. – № 5. – С. 25–29.
 18. Вожолевский А. Л. Комплексная автоматизированная система управления хозяйством сигнализации, связи и вычислительной техники / А. Л. Вожолевский, К. О. Калюжный // Автоматика, телемеханика и связь. – 1995, № 6. – С. 28–30.
- SEQ [* ARABIC 19. Гаврилюк В. І. Застосування нейромережних технологій для діагностування стрілочних переводів з двигунами постійного струму / Гаврилюк В. І., Дуб В. Ю., Маловічко В. В. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – С. 209-213.
20. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей / А. И. Галушкин. – М. : ИПРЖР, 2000. – 415 с.
 21. Грила А. И. Осциллографический метод оценки состояния стрелочных электродвигателей постоянного тока / А. И. Грила // Автоматика, телемеханика и связь. – 1983. – № 12. – С. 28.
- SEQ [* ARABIC 22. Джарратано Д. Экспертные системы: принципы разработки и программирование / Джозеф Джарратано, Гари Райли ; пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1152 с.
23. Джексон П. Введение в экспертные системы / Питер Джексон. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2001. – 624 с.
- SEQ [* ARABIC 24. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения / Дженкинс Г., Ваттс Д. – М. : Мир, 1971. – 317 с.
25. Диагностирование устройств железнодорожной автоматики и агрегатов подвижных единиц: Учебник / [А. Б. Бойник, Г. И. Загарий, С. В. Кошевой и др.]. – Х.: ЧП Издательство “Новое слово”, 2008. – 304 с.
 26. Дилигенский Н. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология / Дилигенский Н. В., Дымова Л. Г., Севастьянов П. В. – М. : Машиностроение, 2004. – 378 с.

27. Дмитренко И. Е. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Дмитренко И. Е., Сапожников В. В., Дьяков Д. В. – М. : Транспорт, 1994. – 263 с.
- SEQ [* ARABIC 28. Дмитренко И. Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Дмитренко И. Е. – М. : Транспорт, 1986. – 142 с.
29. Заде Л. А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Л. А. Заде // – В кн.: Математика сегодня. – М. : Знание, 1974. – С. 5–49.
- SEQ [* ARABIC 30. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Заде Л. А. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
31. Заде Л. А. Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных и интеллектуальных систем / Заде Л. А. // Новости искусственного интеллекта, № 2–3, 2001 . – С. 7–11.
32. Заде Л. А. Тени нечетких множеств / Л. А. Заде // Проблемы передачи информации. – 1966, II, 1. – С. 37–44.
33. Захарченко Д. Д. Тяговые электрические машины. Учебник для вузов ж.-д. трансп. / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов. – М. : Транспорт, 1991. – 343 с.
34. Ивченко Ю. Н. Методы автоматизированного управления парком электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов «по текущему состоянию» / Ю. Н. Ивченко, О. М. Швец, М. В. Скалозуб // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 4. – С. 96–102.
35. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) : ЦШЕОТ 0012. – Офіц. вид. – К. : Державна адміністрація залізничного транспорту України, 1998. – 54 с . – (Затверджено наказом Державної адміністрації залізничного транспорту України № 243-Ц від 05 жовтня 1998 р.).
36. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування: ЦШ 0060. – К.: Укрзалізниця, 2009. – 111 с.
37. Казаков А. А. Станционные устройства автоматики и телемеханики: Учебник для техникумов / Казаков А. А., Бубнов В. Д., Казаков Е. А. – М. : Транспорт, 1990. – 431 с.
- SEQ [* ARABIC 38. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Каллан Р. ; пер. с англ. – М. : Издательский дом "Вильямс", 2001. – 290 с.: ил.
39. Классификация дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов. Дополнение к НТД/ЦП-1-93: Каталог дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов. Дополнение к НТД/ЦП-3-93. / МПС России. – М.: Транспорт, 1996. – 43 с.

40. Классификация и каталог дефектов и поврежденных элементов электрических переводов железных дорог Украины. – Днепропетровск: Арт-Прес, 2000. – 148 с.
41. Кондратьева Л. А. Устройства железнодорожной автоматики и телемеханики : учебник для техникумов ж.-д. трансп. / Л. А. Кондратьева. – М. : Транспорт, 1983. – 232 с.
- SEQ [* ARABIC 42. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов / Копылов И. П. –3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2001. – 327с., ил.
- SEQ [* ARABIC 43. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. – М. : Радио и связь, 1982. – 432 с.
- SEQ [* ARABIC 44. Маловічко В. В. Автоматизований контроль основних параметрів стрілочного електропривода / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 16. – С. 5–7.
45. Маловічко В. В. Автоматизований контроль технічного стану стрілочних електродвигунів постійного струму по кривим споживання струму / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: Вид-во Української державної академії залізничного транспорту, 2007. – Вип. 5, 6. – С. 18–21.
- SEQ [* ARABIC 46. Маловічко В. В. Автоматизація обробки інформації в системах контролю та діагностування стану стрілочних переводів. / Маловічко В. В., Гаврилюк В. І., Рибалка Р. В. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: Вид-во Української державної академії залізничного транспорту, 2009. – Вип. 2. – С. 29–33.
- SEQ [* ARABIC 47. Маловічко В. В. Визначення діагностичних ознак для автоматизованого контролю технічного стану стрілочного електродвигуна / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк, В. Я. Кізяков // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 16. – С. 9–12.
48. Маловічко В. В. Використання системи контролю стану стрілочних двигунів по кривій споживання струму в ремонтно-технологічних дільницях / Маловічко В. В., Гаврилюк В. І., Решетняк М. І. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 18. – С. 11–15.
49. Маловічко В. В. Діагностування стану стрілочних переводів по споживанню струму електродвигунами безпосередньо в умовах поїзної роботи / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: Вид-во Української державної академії залізничного транспорту, 2008. – № 1. – С. 30–34.

50. Маловічко В. В. Діагностування стрілочних переводів по кривим споживання струму в умовах експлуатації на станції / В. В. Маловічко // Збірник наукових праць. Донецький інститут залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – 2007. – Вип. 11. – С. 60–69.
- SEQ [* ARABIC 51. Маловічко В. В. Контроль та діагностування стрілочних переводів по часовій залежності струму переводу стрілки без виключення стрілочного переводу з експлуатації / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк, Р. В. Рибалка // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – Ном. 1. – Д. : Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 4349.
- SEQ [* ARABIC 52. Маловічко В. В. Підвищення експлуатаційної надійності колійних пристроїв електричної централізації / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 15. – С. 11–15.
53. Маловічко В. В. Підвищення ефективності технічного обслуговування стрілочних переводів шляхом автоматизації контролю їх параметрів: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20 / Маловічко Володимир Володимирович. – Д., 2011. – 177 с.
- SEQ [* ARABIC 54. Минский М. Перцептроны / М. Минский, С. Пейперт. – М. : Мир, 1971. – 261 с.
- SEQ [* ARABIC 55. Моделирование электромеханических систем: Підручник / [Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й. та ін.]. – Кременчук, 2001. – 410 с.
56. Назаров А. В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем / А. В. Назаров, А. И. Лоскутов. – СПб. : Наука и техника, 2003. – 384 с.
57. Назаров А. В. Прогнозирование технического состояния низкоорбитальных космических аппаратов с использованием нейросетевых структур в условиях преобладающего влияния факторов космического пространства / А. В. Назаров, Г. И. Козырев, С. В. Шкляр // Автоматика и вычислительная техника. – 2002. – № 6.
- SEQ [* ARABIC 58. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / [Аверкин А. Н., Батыршин И. З., Блишун А. Ф. и др.] ; под ред. Д. А. Поспелова. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 312 с.
59. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток / Нуссбаумер Г. : пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1985.
60. Пат. 8530 Украина, МПК (2011.01) B61L 7/00. Способ дистанционного определения дефектов электрических составляющих, электродвигателя постоянного тока стрелочного перевода / Парфенов В. И., Руденко А. Б.; заявитель и патентообладатель Днепропетровский национальный университет железнодорожного

- транспорта им. академика В. Лазаряна. – № 20041210675; заявл. 24.12.2004; опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8.
61. Пат. 8573 Украина, МПК (2011.01) В61L 7/00. Способ дистанционной диагностики состояния механической части стрелочного перевода с электроприводом постоянного тока / Парфенов В. И., Руденко А. Б.; заявитель и патентообладатель Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна. – № u200500050; заявл. 04.01.2005; опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8.
62. Пат. 31735 Украина, МПК (2006) В61L 7/00. Способ дистанционного контролю та діагностування стрілочних переводів з двигуном постійного струму / Маловічко В. В., Гаврилюк В. І.; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № u200711971; заявл. 29.10.2007; опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8.
63. Пат. 50826 Украина МПК (2009) В61L 7/00. Способ автоматизованого контролю та діагностування стрілочних переводів / Маловічко В. В., Гаврилюк В. І., Рибалка Р. В.; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – № u200913352; заявл. 22.12.2009; опубл. 25.06.2010, Бюл. №12.
- SEQ [* ARABIC 64. Переборов А. С. Диспетчерская централизация: Учебник для вузов железнодорожного транспорта / Переборов А. С., Дрейман О. К., Кондратенко Л. Ф. ; под редакцией Вал. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1989. – 303 с.
- SEQ [* ARABIC 65. Перникис Б. Д. Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ / Б. Д. Перникис, Р. Ш. Ягудин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1994. – 254 с.
- SEQ [* ARABIC 66. Правила технічної експлуатації залізниць України. К. : Міністерство транспорту України, 2003. – 133 с.
- SEQ [* ARABIC 67. Представление нечетких понятий в гибридной экспертной системе СМОПЛЕКС / Р. А. Закуанов, И. З. Батыршин, Г. С. Бикушев, В. П. Архиреев // Труды международного семинара " Мягкие вычисления – 96", под ред. И. З. Батыршина, Д. А. Поспелова, Казань, 1996, – С. 122–128.
- SEQ [* ARABIC 68. Прикладные нечеткие системы / [Асаи К., Ватада Д., Иваи С. и др.] ; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. – М. : Мир, 1993. – 368 с.
- SEQ [* ARABIC 69. Пристрої сигналізації централізації та блокування. Технологія обслуговування: ЦШ 0042. – К. : Укрзалізниця, 2007. – 461 с.
70. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / под ред. О. Д. Гольдберга. – М. : Высш. шк., 1984. – 431 с., ил.
71. Пультяков А. В. Расходование ресурса стрелочных электроприводов / А. В. Пультяков // Межвузовский сборник научных трудов. – Ростов-

- на-Дону, 2001. – С. 83–86.
72. Разгонов А. П. Автоматизация процессов диагностики электродвигателей стрелочных переводов в условиях эксплуатации / А. П. Разгонов, А. Б. Руденко, В. В. Скалзуб, О. М. Швець // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 6. – С. 20–22.
73. Разгонов А. П. Об оценке показателей транспортного потока при отказах / А. П. Разгонов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 1998. – № 4. – С. 31–32.
74. Разгонов А. П. Розробка експериментального програмно-апаратного комплексу з дистанційної діагностики електродвигунів постійного струму стрілочних переводів / А. П. Разгонов, О. Б. Руденко, В. І. Парфьонов, О. М. Швець, Т. М. Сердюк та ін.; Міністерство транспорту України, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – 87 с. – науково-дослідна робота, № держреєстрації 0109U000482.
- SEQ [* ARABIC 75. Резников Ю. М. Стрелочные электроприводы электрической и горочной централизации / Ю. М. Резников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1975. – 152 с.
76. Резников Ю. М. Электроприводы железнодорожной автоматики и телемеханики / Ю. М. Резников. – М. : Транспорт, 1985. – 288 с.
- SEQ [* ARABIC 77. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики: Перцептроны и теория механизмов мозга / Ф. Розенблатт. – М. : Мир, 1965. – 480 с.
- SEQ [* ARABIC 78. Руденко А. Б. Способ дистанционной диагностики электродвигателей типа МСП. Рацпредложение №41 / Руденко А. Б. – Днепропетровск: Днепропетровская 6-я дистанция сигнализации и связи Приднепровской дороги, 1985.
79. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с. : ил.
- SEQ [* ARABIC 80. Сапожников В. В. Основы технической диагностики: Учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / В. В. Сапожников, Вл. В Сапожников. – М. : Маршрут, 2004. – 318 с.
- SEQ [* ARABIC 81. Сапожников Вл. В. Техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики: Учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / Сапожников Вл. В., Борисенко Л. И., Каменев А. И. ; под ред. Вл. Сапожникова. – М. : Издательство «Маршрут», 2003. – 336 с.
- SEQ [* ARABIC 82. Сато Ю. Обработка сигналов. Первое знакомство / Ю. Сато. – Додэка, 2002. – 175 с.
83. Семьянских А. И. Способ дистанционного обнаружения неисправностей в электрическом двигателе постоянного тока / А. И.

- Семьянских, Н. И. Яничек // Автоматика, телемеханика и связь. – 1981 . – № 2. – С. 37–38.
- SEQ [* ARABIC 84. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики / [Ю. А. Кравцов, В. Л. Нестеров, Г. Ф. Лекута и др.] ; под ред. Ю. А. Кравцова. – М. : Транспорт, 1996. – 400 с.
85. Скалозуб В. В. Автоматизация мониторинга и управления эксплуатацией парка электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов на основе параметров текущего технического состояния / В. В. Скалозуб, О. М. Швец // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 60–64.
86. Скалозуб В. В. Автоматизированное нечетко-статистическое управление при моделировании расписания движения пассажирских поездов / В. В. Скалозуб, Е. С. Блохин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – № 4. – С. 98–104.
87. Скалозуб В. В. Диагностика электродвигателей постоянного тока методами спектрального анализа и экспертных систем / В. В. Скалозуб, О. М. Швец, А. Б. Руденко // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : междунар. науч.-практ. конф., 15–16 мая 2008 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2008. – С. 78.
88. Скалозуб В. В. Информационная технология диагностики, прогнозирования и управления устойчивым развитием сложных систем на основе рейтинговых оценок / В. В. Скалозуб, В. А. Андрющенко, С. Ю. Разумов, М. В. Скалозуб, К. С. Фокша, О. М. Швец // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (76). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 178–185.
89. Скалозуб В. В. Метод и информационные технологии нечетко-статистического управления / В. В. Скалозуб // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1 (50). – Дніпропетровськ, 2008. – С. 120 – 127.
90. Скалозуб В. В. Нейросетевые модели диагностики электродвигателей постоянного тока / В. В. Скалозуб, О. М. Швец // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – № 4. – С. 7–11.
- SEQ [* ARABIC 91. Солонина А. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов / Солонина А., Улахович Д., Яковлев Л. – СПб : БХВ-Петербург, 2001. – 464 с.
- SEQ [* ARABIC 92. Сороко В. И. Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника на железных дорогах России: Энциклопедия : в 2 т. Т. 1 / Сороко В. И., Кайнов В. М., Казив Г. Д. – М. : НПФ «ПЛАНЕТА», 2006. – 736 с., ил.
- SEQ [* ARABIC 93. Станционные системы автоматики и телемеханики / [Сапожников В. Вл., Елкин Б. Н., Кокурин И. М. и др.] ; под ред. В. Вл. Сапожникова. – М. : Транспорт, 2000. – 432 с.

94. Таунсенд К. Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ / Таунсенд К., Фохт Д. ; пер. с англ. В. А. Кондратенко, С. В. Трубицына. – М. : Финансы и статистика, 1990. – 320 с.
95. Телеуправление стрелками и сигналами: Учебник для вузов железнодорожного транспорта / [А. С. Переборов, А. М. Брылеев, В. Ю. Ефимов и др.] ; под ред. А. С. Переборова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1981. – 390 с.
- SEQ [* ARABIC 96. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики / [Переборов А. С., Брылеев А. М., Смирнова А. В. и др.]. – М. : Транспорт, 1984. – 384 с.
- SEQ [* ARABIC 97. Технические средства диагностирования: Справочник / [В. В. Ключев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук и др.] ; под общ. ред. В. В. Ключева. – М. : Машиностроение, 1989. – 672 с.
98. Унтеров С. Н. Дистанционный контроль исправности стрелочных электродвигателей / С. Н. Унтеров // Автоматика, телемеханика и связь. – 1993. – № 9. – С. 23–24.
99. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Ф. Уоссермен. – М. : Мир, 1992. – 240 с.
100. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам / Уотермен Д. ; пер. с англ. под ред. В. Л. Стефанюка. – М. : Мир, 1989. – 388 с.
101. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание / Хайкин С. : пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
102. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / Черных И. В. – М. : ДМК Пресс; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.: ил.
103. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – М. : Энергоиздат, 1981. – 576 с., ил.
104. Швец О. М. Автоматизация разработки систем нейросетевого моделирования с использованием компонентов MATLAB / О. М. Швец // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : междунар. науч.-практ. конф., 14–15 мая 2007 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2007. – С. 81.
105. Швец О. М. Автоматизированная технология мониторинга электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов методами искусственных нейронных сетей / О. М. Швец // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : междунар. науч.-практ. конф., 14–15 мая 2009 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2009. – С. 68.
106. Швец О. М. Информационная технология и нечетко-статистическая экспертная система диагностики электродвигателей в условиях рабочей нагрузки / О. М. Швец // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : междунар. науч.-практ. конф., 13–14 мая 2010 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2010. – С. 72.

107. Швец О. М. Классификация объектов по частотному спектру на основе адаптивной базы нечетко-статистических правил / О. М. Швец // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (68). – Дніпропетровськ, 2010. – С. 133–139.
108. Швец О. М. Методы эксплуатации «по текущему состоянию» парков электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов / О. М. Швец // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : междунар. науч.-практ. конф., 12–13 мая 2011 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2011. – С. 81.
109. Швец О. М. Модели и методы повышения эффективности эксплуатации парков электродвигателей железнодорожных стрелочных приводов «по текущему состоянию» / О. М. Швец // Проблемы экономики и управления на железнодорожном транспорте : V междунар. научн.-практ. конф., 24–26 ноября 2010 г., г. Яремче : тезисы докл. – Днепропетровск, 2010. – С. 189.
110. Швец О. М. Ресурсосберегающие методы автоматизированной диагностики электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных приводов / О. М. Швец, А. Б. Руденко // Проблемы экономики транспорта : VIII междунар. науч. конф., 16–17 апр. 2009 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2009. – С. 153.
111. Швец О. М. Технологико-экономические задачи эксплуатации электродвигателей стрелочных приводов железнодорожных станций / О. М. Швец // Проблемы экономики транспорта : IX междунар. науч. конф., 22–23 апр. 2010 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2010. – С. 119.
112. Швець О. М. Діагностика електродвигунів стрілкових переводів на основі нейроно-мережевого моделювання даних спектрального розкладання струмів / О. М. Швець // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 29. – С. 184–189.
113. Шинкаренко В. І. Програмно-апаратний комплекс розшифровки швидкостемірних стрічок / В. І. Шинкаренко, Є. Г. Васецький, Т. М. Мажара, О. М. Швець // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : междунар. науч.-практ. конф., 15–16 мая 2008 г. : тезисы докл. – Днепропетровск, 2008. – С. 80.
114. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / Штовба С. Д. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
115. Экспертные системы. Принципы работы и примеры / Под ред. Р. Форсайта. – М. : Радио и связь, 1987. – 224 с.
116. Ягер Р. Р. Множества уровня для оценки принадлежности нечетких подмножеств // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Пер. с англ.; под ред. Р. Р. Ягера. – М. : Радио и связь, 1986. – С. 71–78.

- SEQ [* ARABIC 117. Яхьяева Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети / Г. Э. Яхьяева. – Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.: ил., табл.
118. Amari S. Statistical theory of overtraining – Is cross-validation asymptotically effective? / S. Amari, N. Murata, K.-R. Miller, M. Finke, H. Yang // *Advances in Neural Informational Processing Systems*, Cambridge, MA: MIT Press. – 1996a, vol. 8, p. 176–182.
119. British track faces scrutiny after 152 km/h derailment // *International Railway Journal*. – 2007. – № 4. – p. 12–13.
120. Kohonen T. *Self-Organizing Maps* / Teuvo Kohonen. – Springer-Verlag, 2001. – 501 p.
121. *Parallel programming with Microsoft .NET : design patterns for decomposition and coordination on multicore architectures* / [Colin Campbell, Ralph Johnson, Ade Miller, Stephen Toub]. – Redmond, WA : Microsoft Press, 2010. – 196 p.
122. Petzold Charles. *Programming Microsoft Windows Forms* / Charles Petzold. – Redmond, WA : Microsoft Press, 2005. – 382 p.
123. Richter Jeffrey. *CLR via C#* / Jeffrey Richter. – 3rd ed. – Microsoft Press. – 2010. – 873 p.
124. Stone M. Cross-validation choice and assessment of statistical predictions / M. Stone // *Journal of the Roayal Statistical Society*. – 1974, vol. B36, p. 111–133.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1.

Акты лабораторных испытаний и приема-сдачи макетного образца
аппаратно-программного комплекса диагностики стрелочных
электродвигателей

Затверджую:
Головний інженер
Дніпропетровської 6-ї дистанції
сигналізації та зв'язку

 Ковригін М.О.

“30” 12 2008 р.

АКТ

лабораторних випробувань макетного зразку програмно-апаратного
комплексу діагностики стрілочних електродвигунів

Комісія у складі заступника ШЧ-6 з СЦБ Коробки С.О., керівника теми професора кафедри АТЗ ДНУЗТ Разгонова О.П., електромеханіка ШЧ-6 Руденка О.Б., молодшого наукового співробітника кафедри КІТ Швеця О.М., інженера Парфенова В.І. 21.11.2008 р. провела випробування макетного зразку та встановила наступне:

1. програмно-апаратний комплекс відповідає технічним вимогам, обумовленим договором на виконання науково-дослідної роботи № ПР/НГО-071423/НЮ від 18.07.08. “Розробка експериментального програмно-апаратного комплексу з дистанційної діагностики електродвигунів постійного струму стрілочних переводів” від 11 червня 2007 року;
2. при випробуваннях несправних електродвигунів комплекс встановлює характер несправності (обрив обмоток якоря, КЗ обмотки збуджування, КЗ обмоток якоря, пробій колектора і т.ін.);
3. випробування виконані у відповідності до програми, відповідаючий технологічній карті.

Заступник ШЧ-6



С.О. Коробка

Професор кафедри АТЗ ДНУЗТ



О.П. Разгонов

Електромеханік ШЧ-6



О.Б. Руденко

Молодший науковий співробітник
кафедри КІТ ДНУЗТ



О.М. Швець

Затверджую:
Перший заступник начальника
служби сигналізації та зв'язку
Придніпровської залізниці



Нестеренко Я.Я.

2008 р.

АКТ

приймання-здачі макетного зразку програмно-апаратного комплексу
діагностики стрілочних електродвигунів

Комісія у складі заступника ШЧ-6 з СЦБ Коробки С.О., керівника теми професора кафедри АТЗ ДНУЗТ Разгонова О.П., електромеханіка ШЧ-6 Руденка О.Б., молодшого наукового співробітника кафедри КІТ Швеця О.М., інженера Парфенова В.І. провела приймальні випробування та встановила наступне:

- при навмисній відмові електродвигуна програмно-апаратний комплекс визначає характер відмови з відображенням інформації на дисплеї комплексу;
- рекомендувати встановити комплекс на експлуатаційне випробування на одній зі станцій, обладнаній електричною централізацією зі стрілочними електродвигунами постійного струму.

Головний інженер ШЧ-6

М.О. Ковригін

Заступник ШЧ-6

С.О. Коробка

Професор кафедри АТЗ ДНУЗТ

О.П. Разгонов

Електромеханік ШЧ-6

О.Б. Руденко

Молодший науковий співробітник
кафедри КІТ ДНУЗТ

О.М. Швець

Приложение 2.

Оценка экономического эффекта внедрения аппаратно-программного комплекса диагностики электродвигателей постоянного тока стрелочных переводов

Для расчета экономического эффекта [17] новые технологические процессы и новую технику относят к первой группе. Годовой экономический эффект \mathcal{E} от применения новых процессов и новой техники первой группы определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = (31 - 32) \cdot A_2,$$

где 31, 32 – стоимость единицы профилактики при базовом и новом процессе технического обслуживания стрелочных приводов в год, грн.;
 A_2 – число профилактик в год.

При внедрении АПК экономический эффект достигается за счет следующих факторов:

- сокращение времени профилактики, час.;
- сокращение числа отказов, за счет прогнозирования времени начала развития неисправности, снижения задержек поездов и повышения безопасности движения;
- снижение расходов на текущий ремонт, грн.

С учетом этих факторов:

$$31 = S_{\text{э}} \cdot \text{ппр} \cdot \text{тэпр} + S_{\text{м}} \cdot \text{ппр} \cdot \text{тмпр},$$

где $S_{\text{э}}$, $S_{\text{м}}$ – почасовые ставки электромеханика и электромонтера, грн;
 тэпр , тмпр – длительность профилактики электропривода для электромеханика и электромонтера, час.;
 ппр – число профилактик в году (принято 24 - в соответствии с инструкцией ЦШЕОТ-0012 [35]).

Расходы на профилактику по новой технологии:

$$32 = S_{\text{э}} \cdot \text{ппр} \cdot \text{тэпр} + S_{\text{м}} \cdot \text{ппр} \cdot \text{тмпр}.$$

Если принять почасовые ставки электромеханика $S_{\text{э}} = 11,5$ грн/час; электромонтера $S_{\text{м}} = 8,5$ грн/час; а длительность профилактики $\text{тэпр} = 0,17$ час.; $\text{тмпр} = 0,25$ час., тогда расходы на одну профилактику одной стрелки по базовой технологии составят:

$$31_{\text{пр}} = 11,5 \cdot 0,17 + 8,5 \cdot 0,25 = 4,08 \text{ грн/пр.}$$

Расходы за год по базовой технологии составят:

$$31 = 4,08 \cdot 24 = 97,92 \text{ грн.}$$

Расходы по новой технологии, при $\text{тэпр} = 0,13$ час.; $\text{тмпр} = 0,17$ час. составят:

$$32_{\text{пр}} = 11,5 \cdot 0,13 + 8,5 \cdot 0,17 = 2,94 \text{ грн/пр.}$$

Расходы за год по новой технологии составят:

$$32 = 2,94 \cdot 24 = 70,56 \text{ грн.}$$

Годовая экономия средств на профилактику одной стрелки в год достигнет:

$$\mathcal{E}_{\text{стр}} = 31 - 32 = 97,92 - 70,56 = 27,36 \text{ грн.}$$

На дистанции ШЧ-6 Приднепровской железной дороги эксплуатируется примерно $N = 810$ электрических стрелок. При внедрении программно-аппаратного комплекса для диагностики на одной дистанции дороги экономия средств на профилактику электроприводов составит:

$$Э_{пр} = Э_{стр} \cdot N = 27,36 \cdot 810 = 22161,6 \text{ грн/год.}$$

Проведем оценку расходов на компенсацию потерь от отказов стрелок. Как установлено в п. 1.1, интенсивность потока отказов стрелок

составляет λ 1/ч. Считая, что время между отказами подчиняется экспонентному закону, вероятность отказа стрелки составит

а число отказов по дистанции достигнет

отказов в год.

С внедрением АПК число отказов сократится приблизительно в 3 раза. Согласно [73], при пропускной способности 70 пар поездов в сутки, и

времени возобновления отказа $t_{в}$ часов задержки поездов достигнут

n поездов в час. Тогда $N_{з}$, а суммарные задержки поездов в год достигнут

поездов в год.

Стоимость задержки грузового поезда на один поезд/час примем

$C_{з}$, тогда для компенсации потерь от задержек по одной дистанции при наличии комплекса будет нужно

грн.,

а при базовой технологии эту сумму стоит увеличить приблизительно в 3 раза, тогда экономия потерь от отказов достигнет

грн.

Установлено, что отказ электродвигателя, как правило, сопровождается средним ремонтом, стоимость расходов при этом 125 грн. за двигатель. При использовании АПК неисправность выявляется на ранней стадии ее развития, поэтому при восстановлении отказа производят текущий ремонт, стоимостью 80 грн. Тогда экономия средств на возобновление электропривода достигнет 45 грн., а общий эффект

грн.

Суммарный экономический эффект в год по дистанции достигнет

грн.

По 10 дистанциям дороги оценка экономического эффекта внедрения аппаратно-программного комплекса диагностики электродвигателей постоянного тока стрелочных переводов составляет

грн. в год.

Приложение 3.

Программный модуль нечетко-статистической экспертной системы выявления неисправностей в электродвигателях постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов

Программный модуль диагностики электродвигателей является составной частью аппаратно-программного комплекса диагностики электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов (п. 2.2).

Программный модуль диагностики электродвигателей создан для выявления неисправностей в электродвигателях. Процесс определения неисправностей является автоматизированным. Выявление неисправностей при помощи разработанного программного модуля не требует специальных знаний о физике процессов в электродвигателе, знаний частотного спектра рабочего тока электродвигателя, осведомленности о соответствии между гармониками спектрального разложения тока двигателя и его неисправностями (п. 2.3.2). Программный модуль диагностики двигателей содержит базу знаний о неисправностях электродвигателей. Эта база неисправностей ЭД формируется на основе опытных данных и знаний эксперта (п. 3.3). Использование программного модуля диагностики электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных переводов не требует высококвалифицированного инженера электромеханика. Благодаря дружественному графическому интерфейсу пользователя диагностику электродвигателей могут выполнять рядовые электромеханики станций.

Входными данными для диагностики электродвигателя является кривая тока двигателя. В разработанном аппаратно-программном комплексе проводилось преобразование рабочего тока электродвигателя в форму импульсно-кодовой модуляции. Для преобразования аналогового сигнала была выбрана частота дискретизации равная 11025 герц. Разрядность выборки составляла 16 бит. Полученная последовательность дискретных значений записывалась в wav-файлы, соответствующие стандарту файлов uncompressed Microsoft PCM audio (п. 2.3).

Модуль диагностики ЭД разработан на базе платформы Microsoft .NET Framework с использованием языка C#. Окно программного модуля диагностики электродвигателей постоянного тока железнодорожных стрелочных приводов представлено на рис. В.1.

Рисунок В.1 – Окно программного модуля диагностики электродвигателей:
 1 – поле ввода пути; 2 – кнопка запуска диагностики; 3 – кнопка открытия файла; 4 – поле результатов диагностики; 5 – поле частоты дискретизации сигнала; 6 – поле разрядности выборки; 7 – поле количества каналов; 8 – поле длительности сигнала.

Ниже следует описание основных компонент окна (рис. В.1).

Поле ввода пути (рис. В.1). В это поле можно ввести путь к wav-файлу, хранящему сигнал импульсно-кодовой модуляции кривой тока двигателя. Путь к файлу также может быть скопирован в это поле из другой программы, например, проводника Windows. Допускается редактирование пути к файлу в этом поле.

Кнопка запуска диагностики (рис. В.1). При нажатии на эту кнопку происходит анализ данных из того wav-файла, путь к которому был указан в поле ввода пути. Данная кнопка недоступна, если в поле ввода не введен путь к файлу или введенный путь указывает на несуществующий файл.

Кнопка открытия файла (рис. В.1). При нажатии на эту кнопку вызывается диалог открытия wav-файла (рис. В.2). Этот диалог позволяет выбрать wav-файл, сохраненный на компьютере. При выборе нужного wav-файла и нажатии на кнопку «Открыть» данного диалога путь к выбранному файлу заносится в поле ввода пути файла. После этого становится доступна кнопка запуска диагностики двигателя. Также после выбора необходимого wav-файла в строке состояния отображается информация о выбранном файле (элементы 5 – 8 на рис. В.1). Вид окна модуля диагностики электродвигателя для выбранного файла представлен на рис. В.3.

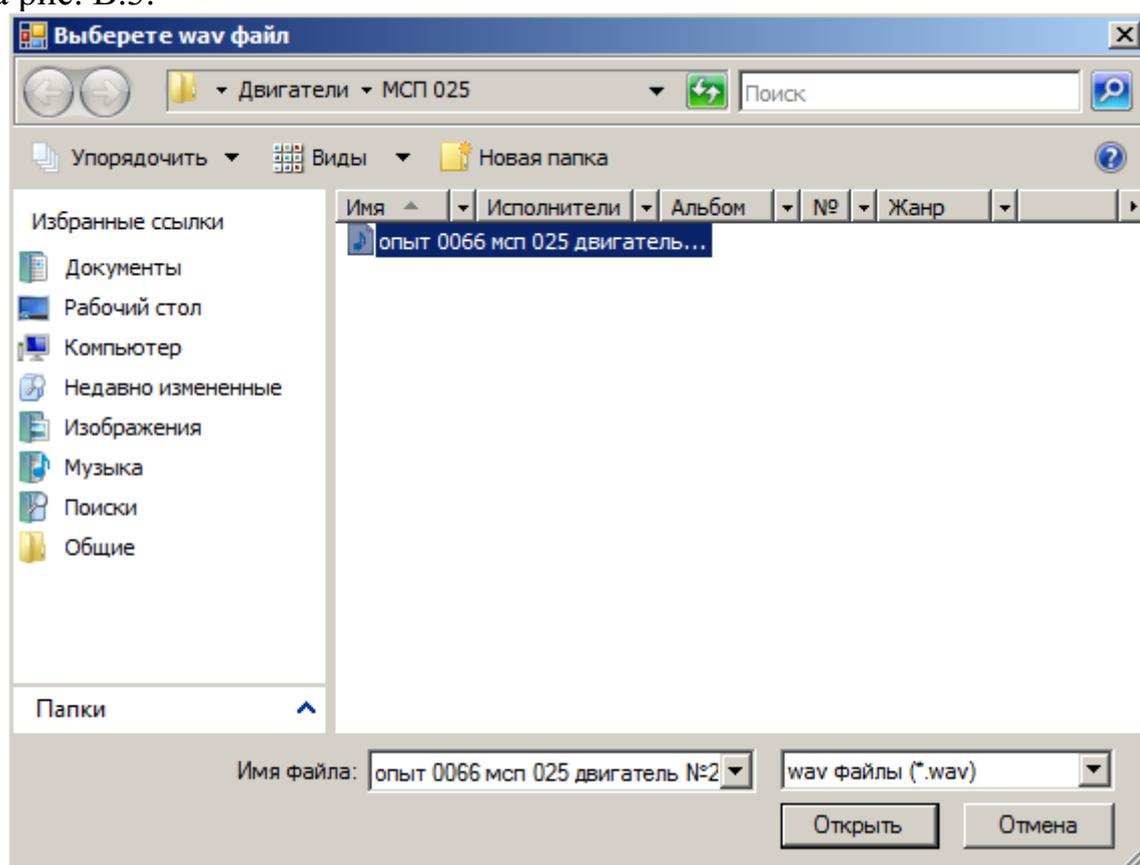


Рисунок В.2 – Диалог открытия wav-файла

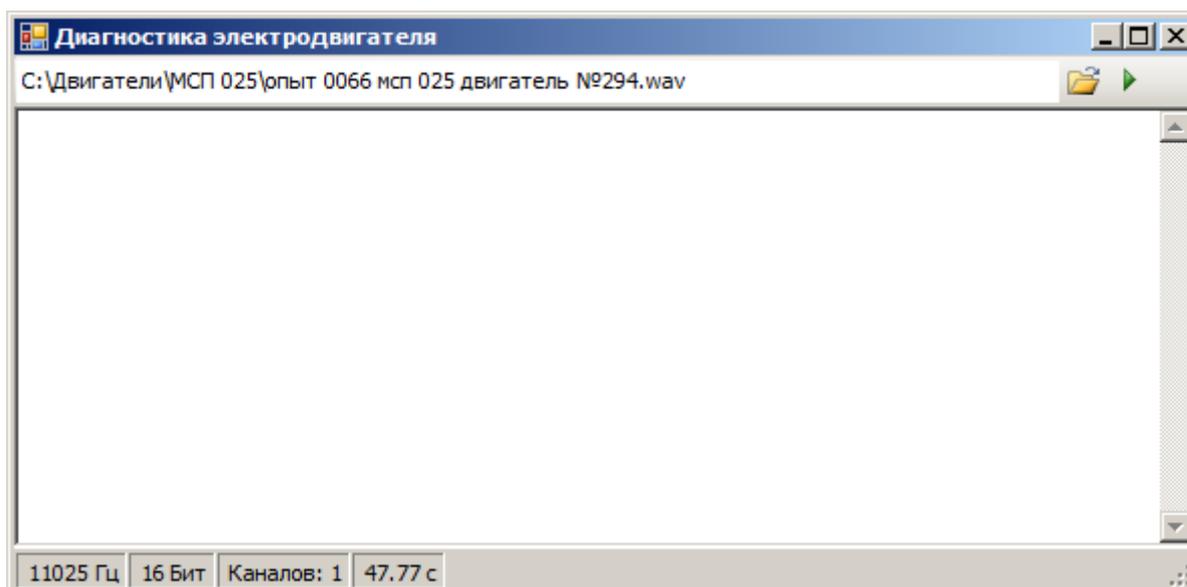


Рисунок В.3 – Окно диагностики двигателя после выбора файла

Поле результатов диагностики (рис. В.1). В это поле выводится результат диагностики, исходя из данных выбранного файла. Поле заполняется после нажатия на кнопку запуска диагностики.

Поле частоты дискретизации сигнала (рис. В.1). Это поле указывает на частоту дискретизации аналогового сигнала для выбранного файла. Поле становится активным после задания пути к существующему wav-файлу в поле ввода пути. Для примера, представленного на рис. В.3, частота дискретизации сигнала в выбранном файле составила 11025 Гц.

Поле разрядности выборки (рис. В.1). Это поле показывает разрядность выборки дискретного сигнала, что использовалась при создании wav-файла. Поле становится активным после задания пути к существующему wav-файлу в поле ввода пути. Для примера, представленного на рис. В.3, разрядность дискретизации в выбранном файле составила 16 бит.

Поле количества каналов (рис. В.1). Это поле указывает количество дискретных каналов, записанных в wav-файл. Поле становится активным после задания пути к существующему wav-файлу в поле ввода пути. Для примера, представленного на рис. В.3, количество каналов в выбранном файле равно 1.

Поле длительности сигнала (рис. В.1). Поле отображает длительность дискретного сигнала (в секундах), записанного в wav-файл. Поле становится активным после задания пути к существующему wav-файлу в поле ввода пути. Для примера, представленного на рис. В.3, длительность сигнала составила 47.77 секунды.

При нажатии на кнопку запуска диагностики двигателя информация о найденных в двигателе неисправностях выводится в поле результатов диагностики. К примеру, для двигателя «МСП 0.25 номер 294», кривая тока которого была дискретизирована и сохранена в файл «C:\Двигатели\МСП 025\опыт 0066 мсп 025 двигатель №294.wav» результаты

диагностики представлены на рис. В.4. Система диагностики сообщила об обнаружении в двигателе дефекта. Тип дефекта: "2 обрыва". Система диагностики также дает оценку достоверности обнаруженных дефектов. В приведенном примере уровень достоверности обнаруженного дефекта составил 77%.

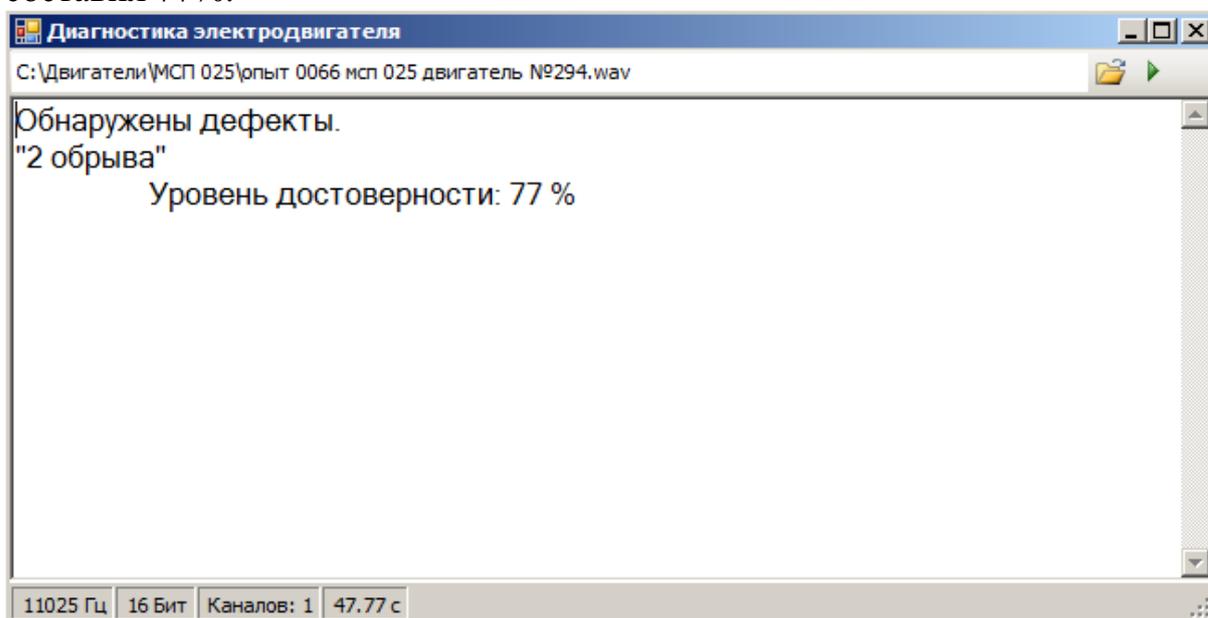


Рисунок В.4 – Результаты диагностики двигателя МСП-0,25 №294

В случае диагностики исправного двигателя или двигателя, содержащего неизвестные системе диагностики дефекты выдается сообщение о том, что дефекты не обнаружены (рис. В.5).

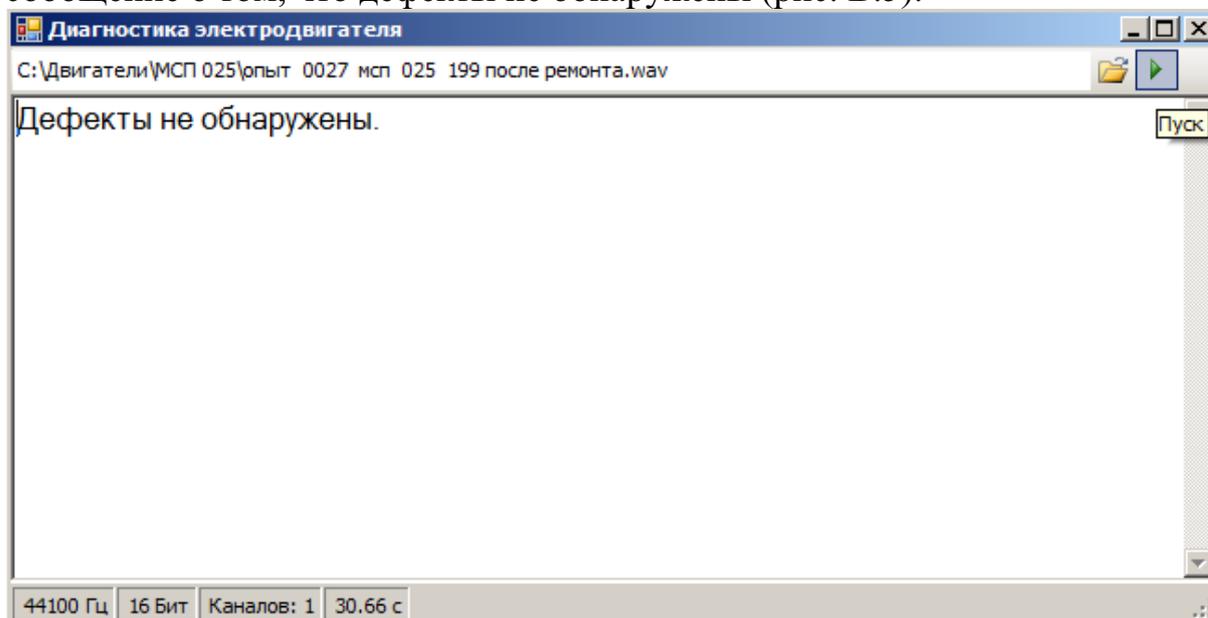


Рисунок В.5 – Результаты диагностики двигателя МСП-0,25 №199

Для двигателей, содержащих несколько дефектов одновременно, система выдает список обнаруженных дефектов с указанием соответствующих уровней достоверности (рис. В.6).

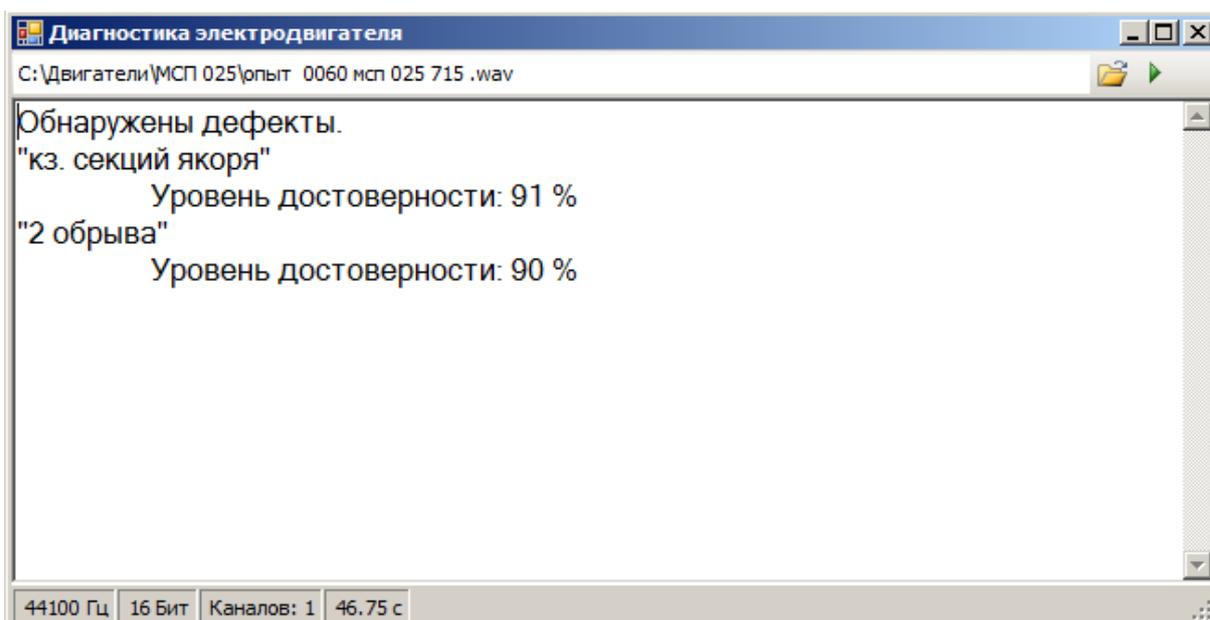


Рисунок В.6 – Обнаружение нескольких дефектов в двигателе МСП-0,25 №715

Модуль групповой диагностики электродвигателей позволяет выявлять неисправности для группы электродвигателей. Рабочий ток каждого из диагностируемых двигателей преобразуется в форму импульсно-кодовой модуляции. Полученное множество дискретных значений аналогового сигнала тока двигателя сохраняется в wav-файлы, соответствующий стандарту uncompressed Microsoft PCM audio. Внешний вид окна модуля групповой диагностики электродвигателей представлен на рис. В.7.

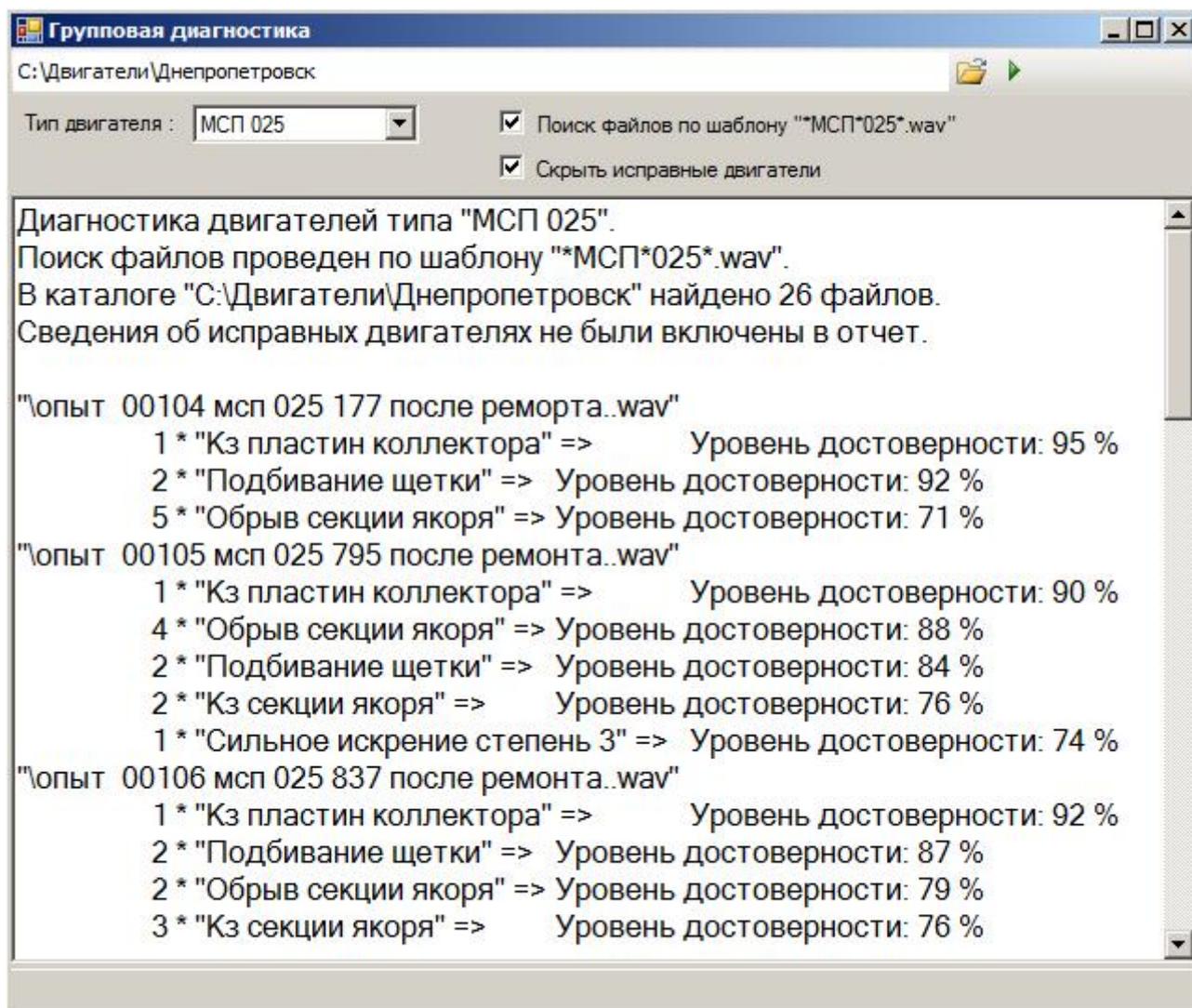


Рисунок В.7 – Окно модуля групповой диагностики электродвигателей

В верхней части окна модуля групповой диагностики (рис. В.7) находится поле пути к каталогу, содержащему множество wav-файлов двигателей для групповой диагностики. В это поле можно ввести путь к каталогу вручную или, нажав кнопку , выбрать каталог посредством стандартного диалога выбора каталога.

Разработанный модуль позволяет проводить диагностику двигателей следующих типов: ДП-0,18, ДП-0,25, МСП-0,15 и МСП-0,25. Тип диагностируемого двигателя выбирается в выпадающем списке «Тип двигателя».

Модуль групповой диагностики производит выявление неисправностей для всех wav-файлов двигателей, найденных в указанном каталоге. Если установить галочку «Поиск файлов по шаблону ...», то для диагностики будут отобраны только те wav-файлы из указанного каталога, в именах которых встречается выбранный тип двигателя, например «МСП 0.25».

После нажатия кнопки запуска диагностики , сведения о выявленных неисправностях будут отображены в поле результатов

диагностики (). Если установлена галочка «Скрыть исправные двигатели», то сведения о двигателях, в которых не выявлено неисправностей, не будут включены в отчет. В отчете для каждого wav-файла двигателя указывается обнаруженная неисправность, количество неисправностей данного типа и уровень достоверности обнаруженной неисправности. Например, строка в отчете «2 * "Подбивание щетки" => Уровень достоверности: 92 %» означает, что в диагностируемом двигателе было выявлено два подбивания щетки при уровне достоверности в 92%.

Модуль диагностики позволяет выявлять неисправности следующих типов: «Внутренний пробой коллектора», «Кз пластин коллектора», «Кз секции якоря», «Круговой огонь по коллектору», «Массовое кз пластин коллектора», «Массовые обрывы секций якоря», «Обрыв секции якоря», «Подбивание щетки», «Сильное искрение», «Сильное искрение при повышенных оборотах», «Сильное искрение степень 3». Работоспособность модуля диагностики и достоверность получаемых результатов подтверждены Актом испытаний (Приложение А).

Приложение 4. Спектрограммы электродвигателей постоянного тока с различными видами неисправностей

В приложении представлены спектральные характеристики электродвигателей железнодорожных стрелочных переводов. Виды неисправностей ЭД определялись экспертом, электромехаником СЦБ Руденко А. Б. средствами разработанного программно-аппаратного комплекса согласно методике, указанной в [60, 61]. Электродвигатели проверялись на стенде, каждая проверка состояла из шести опытов: 1 – 2 правое, левое вращение с дросселем (эквивалент индуктивности кабеля длиной 1 км.); 3 – 4 правое, левое вращение без дросселя; 5 – 6 два опыта холостого хода.

На рис. Г.1 представлена спектрограмма исправного электродвигателя. На этой и последующих спектрограммах по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат – частота гармоник спектра. Амплитуда гармоник спектра рабочего тока электродвигателя обозначается на спектрограмме при помощи цвета, чем ближе цвет к красному, тем больше амплитуда гармоники. Цветовая шкала амплитуд гармоник представлена справа на каждой спектрограмме.

Частоты спектрограммы (рис. Г.1) имеют следующее значение (снизу вверх):

- случайное незначительное событие (царапина на коллекторе, непритертость щетки);
- квазигармоника 100 Гц;
- основная пульсация выпрямителя 300 Гц;
- 2я гармоника 600 Гц;
- скоростная частота.

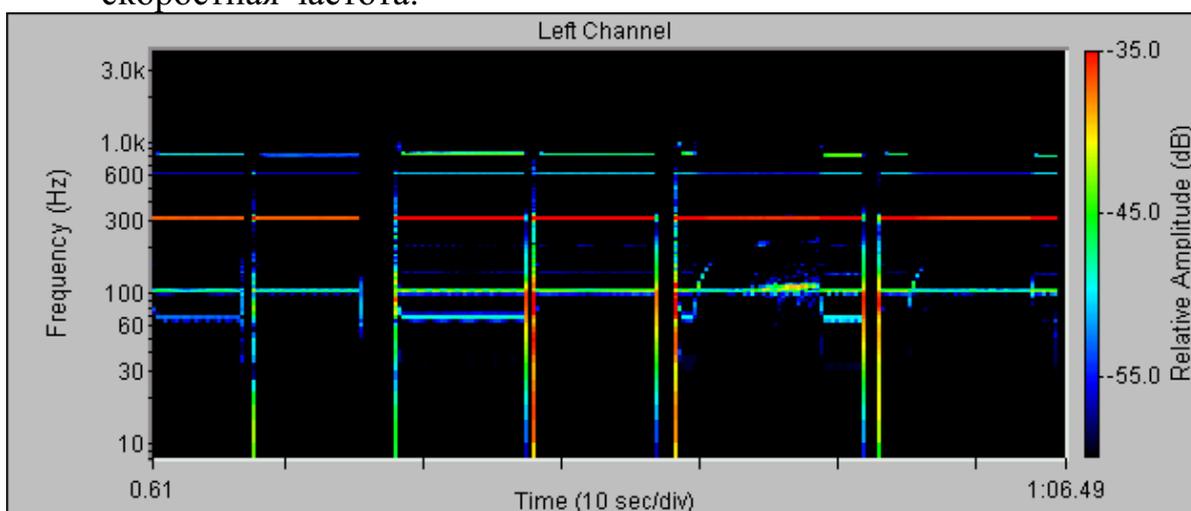


Рисунок Г.1 – Спектрограмма исправного электродвигателя
модели МСП-0,25

На рис. Г.2 представлен фрагмент осциллограммы исправного ЭД, спектрограмма которого отображена на рис. Г.1.

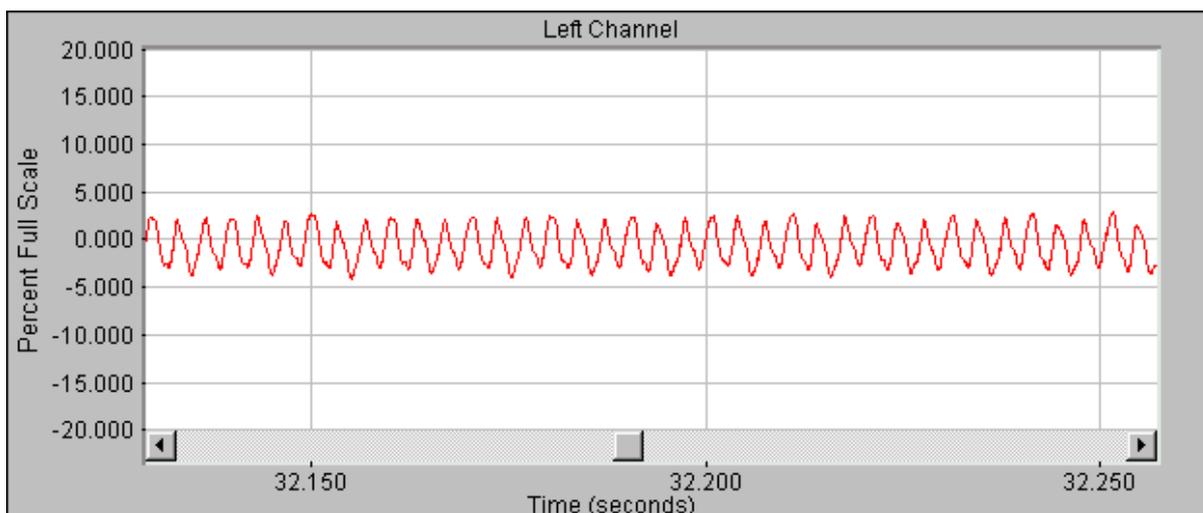


Рисунок Г.2 – Осциллограмма исправного электродвигателя модели МСП-0,25

Спектрограмма и фрагмент осциллограммы двигателя с двумя короткими замыканиями секций якоря отображены на рис. Г.3. Основная частота отказа составляет 70 Гц. Также в спектре тока двигателя присутствуют гармоники основной частоты отказа. При увеличении тока нагрузки электродвигателя амплитуда гармоник растет.

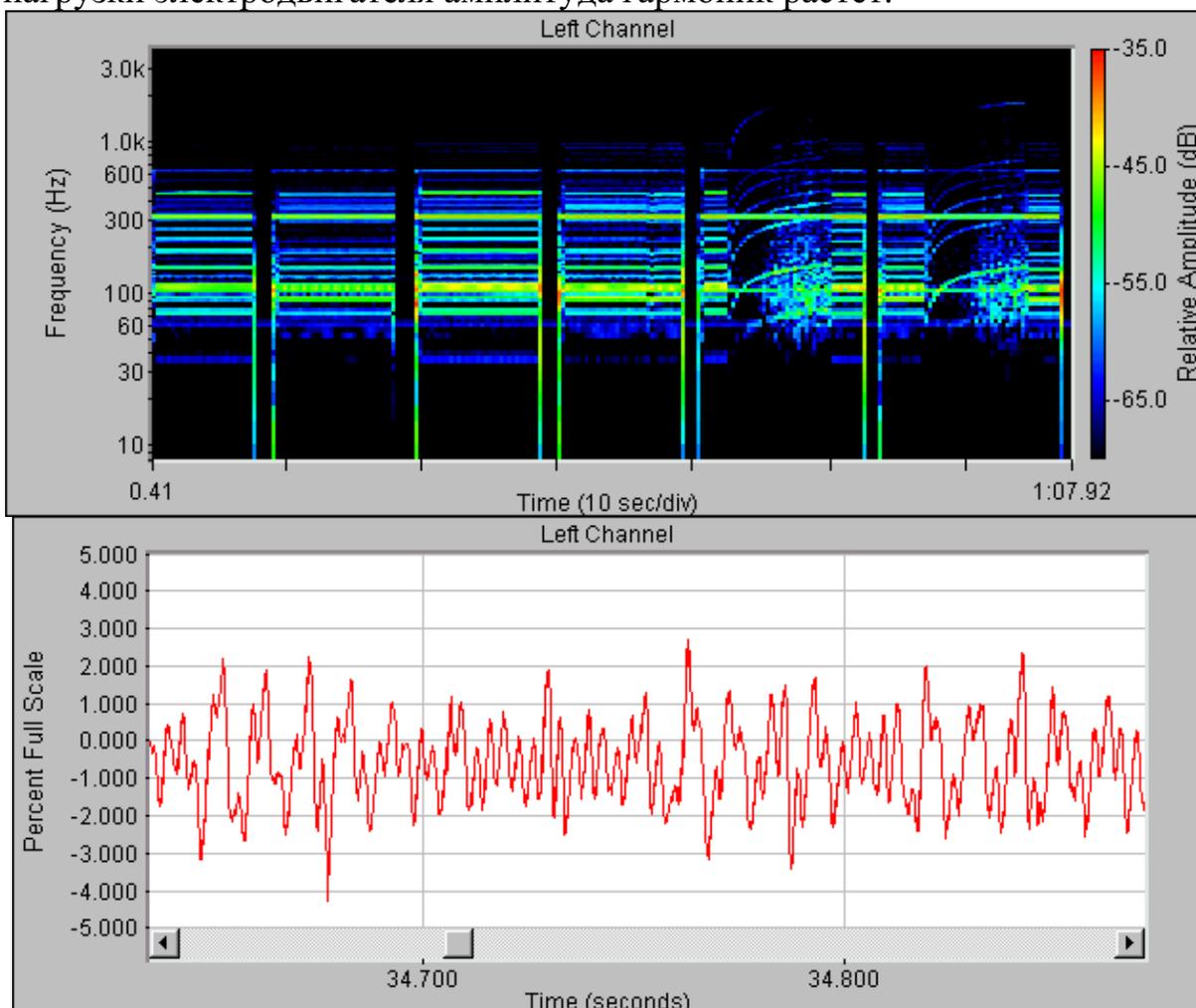


Рисунок Г.3 – Спектрограмма и фрагмент осциллограммы двигателя модели МСП-0,15 с двумя короткими замыканиями секций якоря

На рис. Г.4 представлена спектрограмма электродвигателя с тремя обрывами секций якоря, расположенными в следующей последовательности: одна секция оборвана – одна исправна – две секции оборваны. На спектрограмме электродвигателя присутствует большое количество гармоник, характерных для данной неисправности. Спектрограмма характеризует частотный спектр электродвигателя при различных значения тока нагрузки, который изменялся в пределах от 1.0 А до 8.0 А.

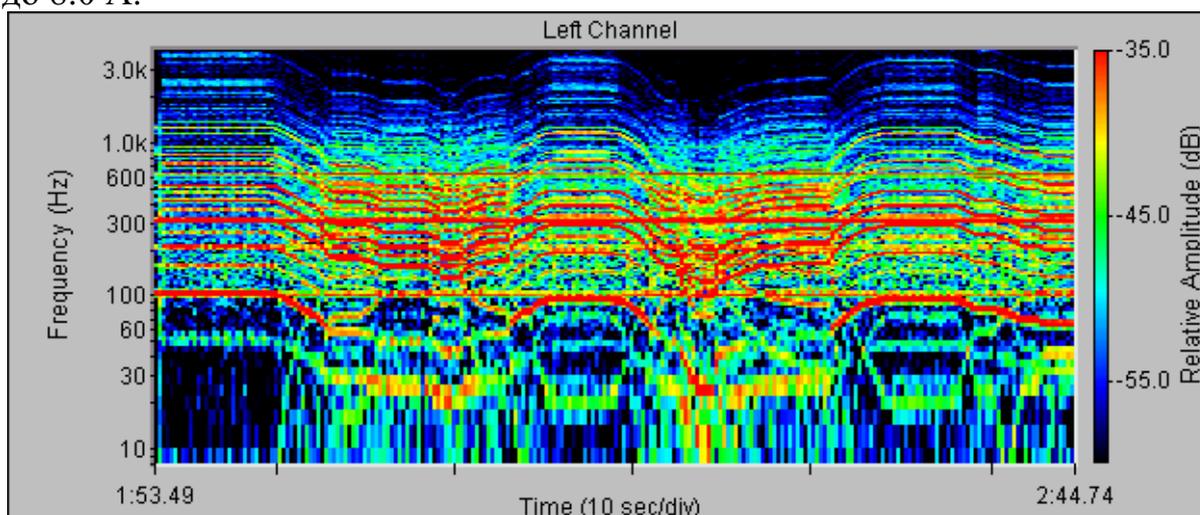


Рисунок Г.4 – Спектрограмма электродвигателя модели МСП-0,25 с тремя обрывами секций якоря

На рис. Г.5 изображена спектрограмма электродвигателя модели МСП -0,25 с зависанием щетки. Отказ возник после затопления приводов по ст. Днепропетровск, что привело к окислению щеткодержателя, щетка после нескольких срабатываний стерлась и зависла. Частота отказа, характеризующая зависания щетки, составляет 24 Гц. Частота равна скорости вращения ЭД и всегда лежит в диапазоне 15 – 40 Гц для данного типа двигателей.

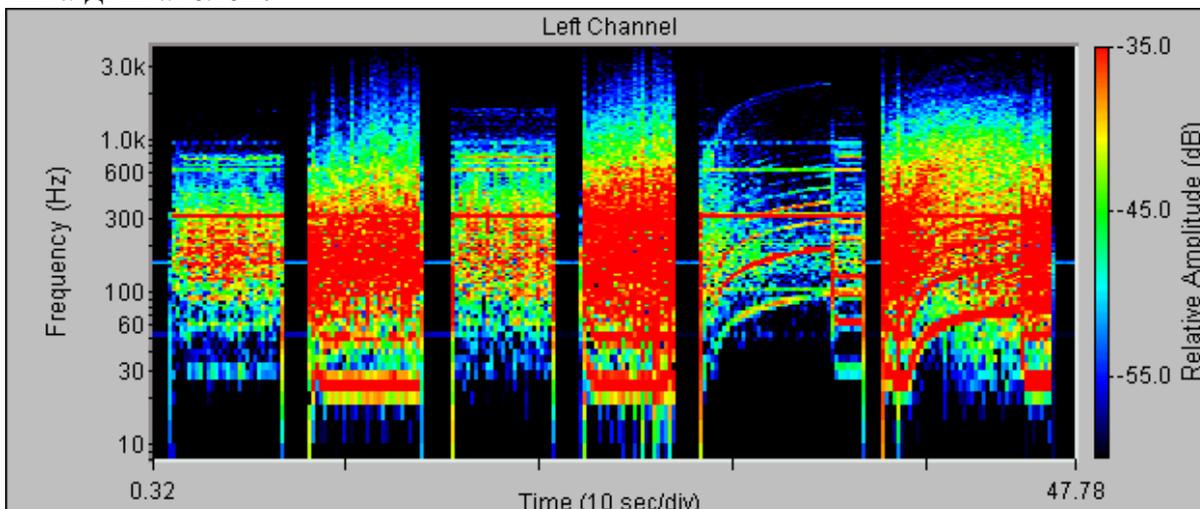


Рисунок Г.5 – Спектрограмма электродвигателя модели МСП-0,25 с зависанием щетки

Спектрограмма и осциллограмма электродвигателя с подгаром коллектора и потерей контакта представлена на рис. Г.6. Подгар коллектора и потеря контакта – отказ, который проявляется одинаково с отказом зависания щетки. Отказ возник из-за неправильных действий дежурной по станции, когда перевод стрелки был произведен не через нулевое положение рукоятки управления. На коллекторе образовалось пятно после вспышки в районе двух коллекторных пластин, состоящее из частиц меди и графита, выступающее над коллектором и подбивающее щетку. При этом основная частота гармоник отказа также лежит в диапазоне 15 – 40 Гц.

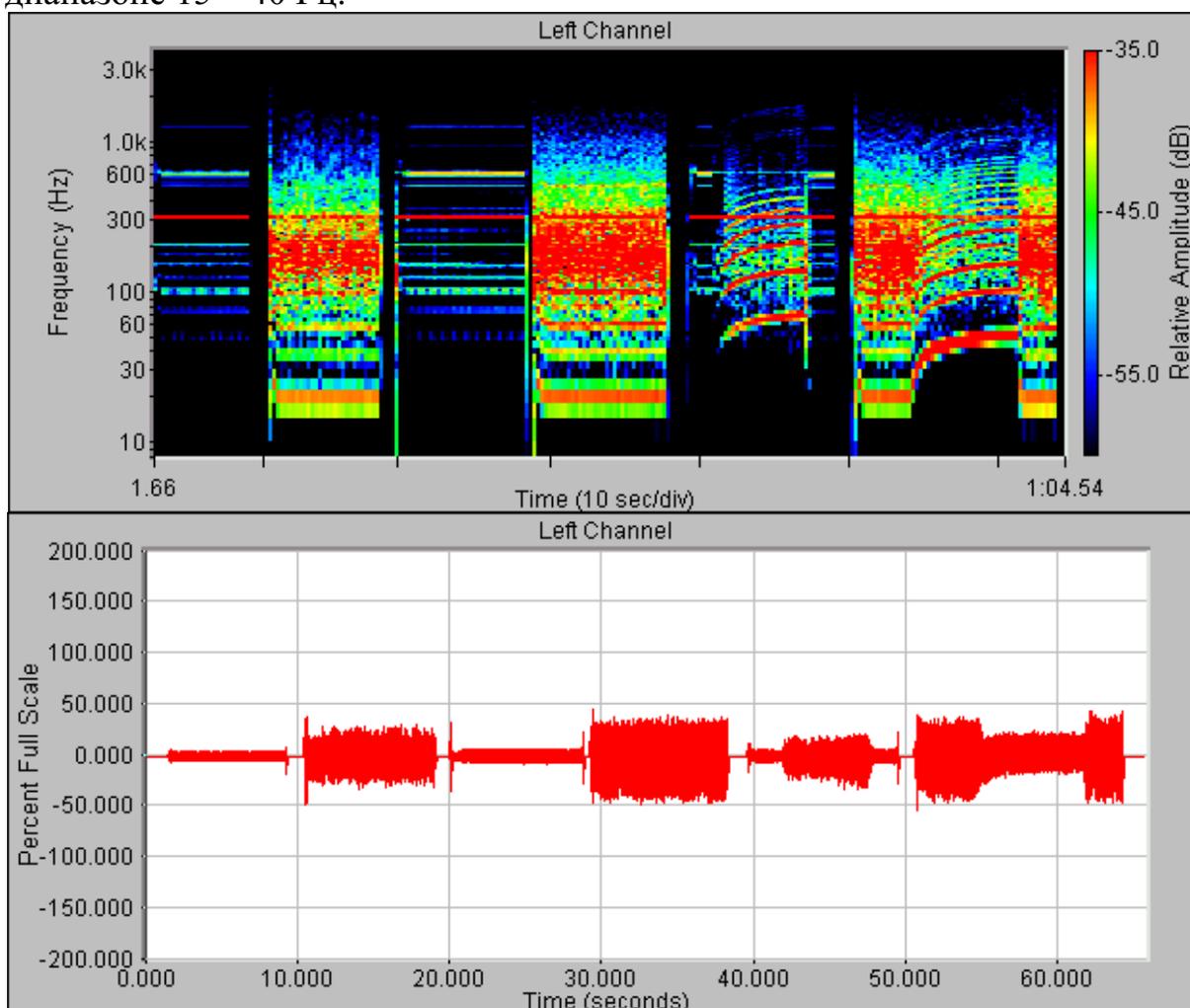


Рисунок Г.6 – Спектрограмма и осциллограмма электродвигателя модели МСП-0,25: подгар коллектора, потеря контакта

Для изучения спектральных характеристик ЭД с коротким замыканием (КЗ) секций якоря данный вид отказа был вызван искусственно для исправного ЭД, получены соответствующие спектрограмма и осциллограмма (рис. Г.7).

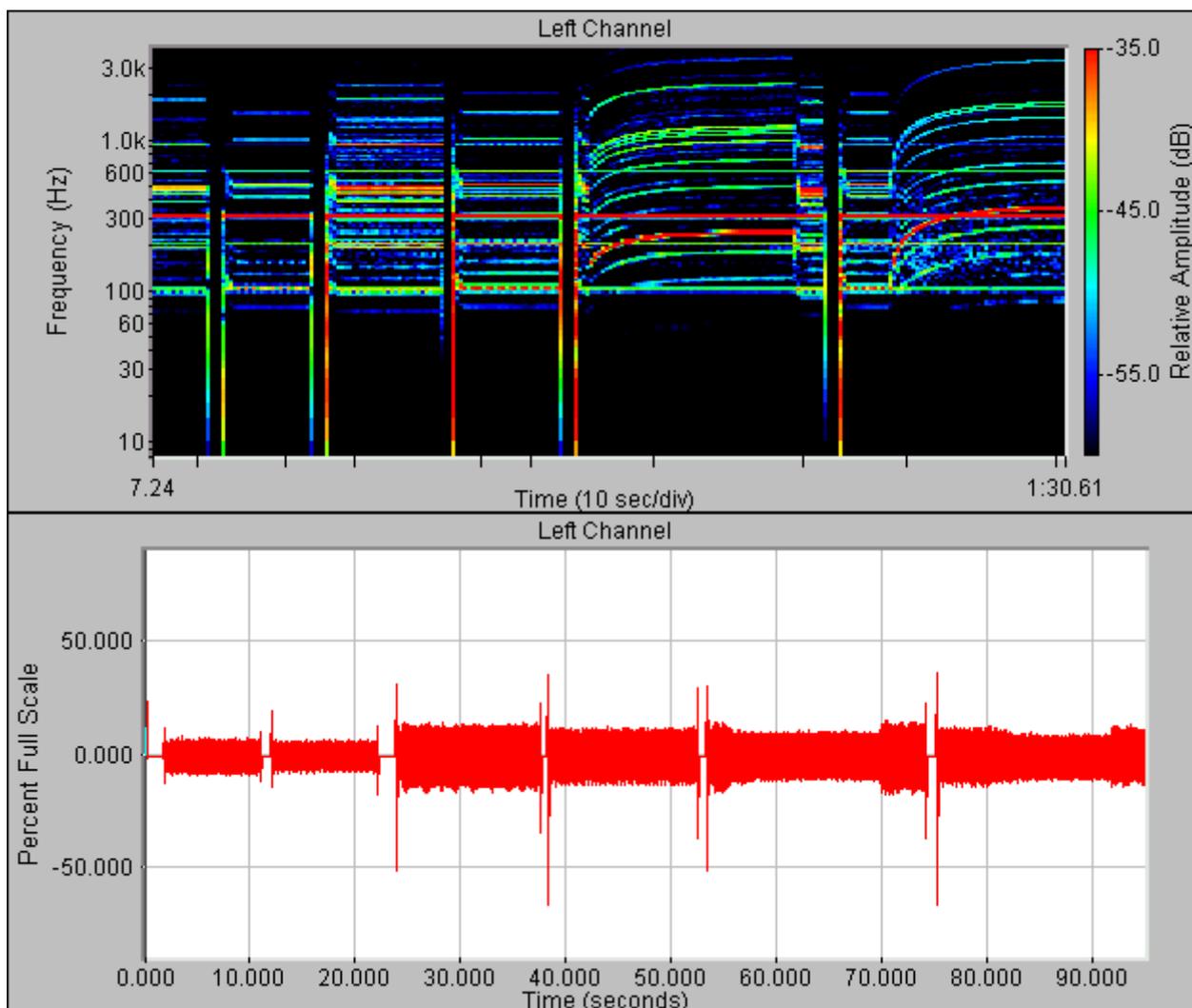


Рисунок Г.7 – Спектрограмма и осциллограмма электродвигателя модели ДП-0,18 с искусственно вызванным коротким замыканием секций якоря

На рис. Г.8 изображена спектрограмма электродвигателя модели ДП-0,18 с коротким замыканием пластин коллектора. Частота отказа равняется 86 Гц, а 2-я скоростная частота – 414 Гц.

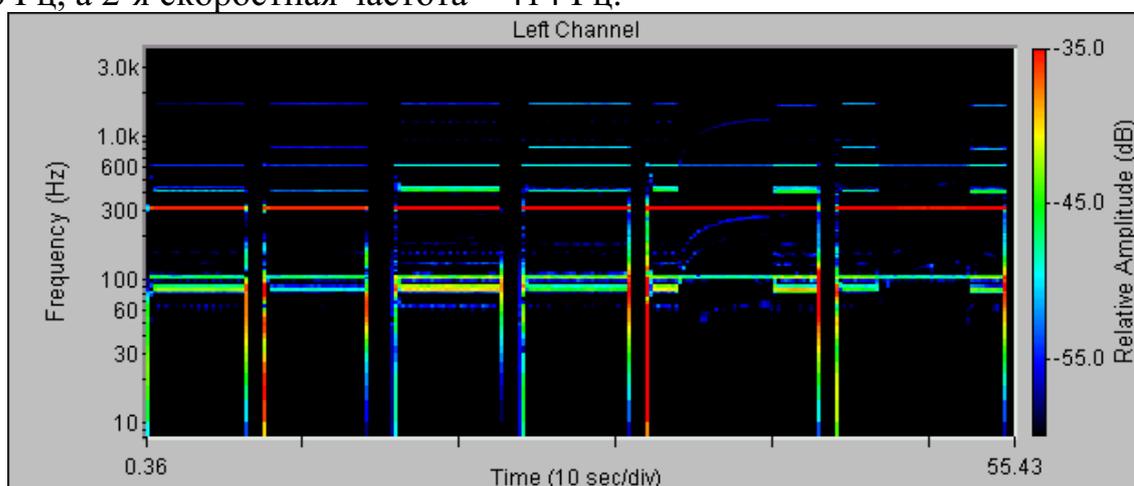


Рисунок Г.8 – Спектрограмма электродвигателя модели ДП-0,18 с коротким замыканием пластин коллектора

На рис. Г.9 представлена спектрограмма и осциллограмма электродвигателя модели МСП-0,25 с двумя обрывами секций якоря

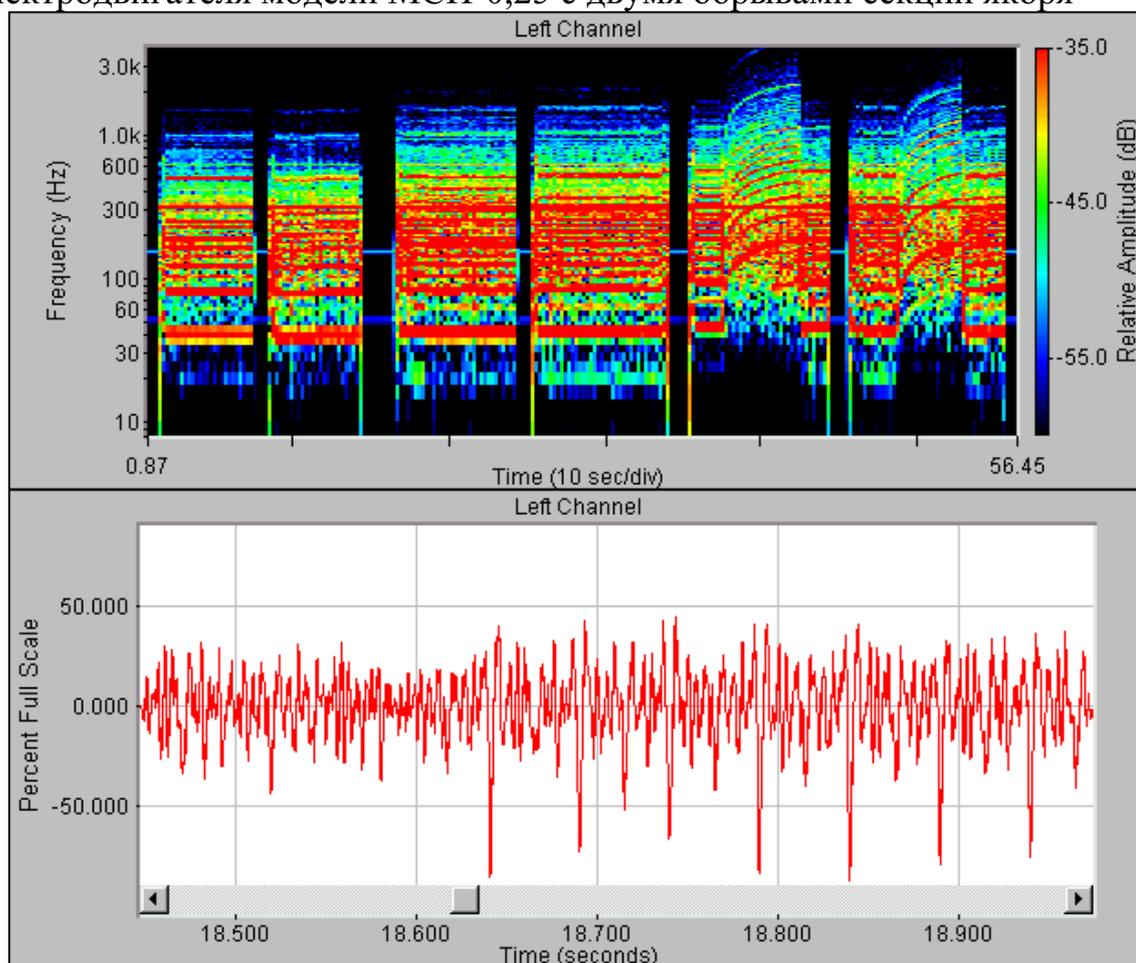
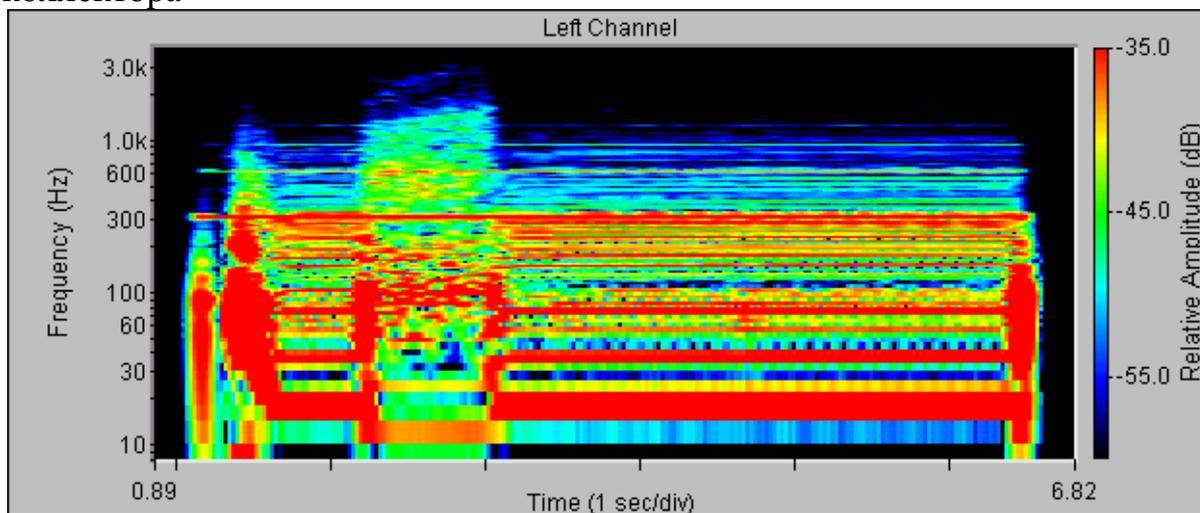


Рисунок Г.9 – Спектрограмма и осциллограмма электродвигателя модели МСП-0,25 с двумя обрывами секций якоря

На рис. Г.10 представлена спектрограмма и осциллограмма электродвигателя модели МСП-0,25 с коротким замыканием пластин коллектора



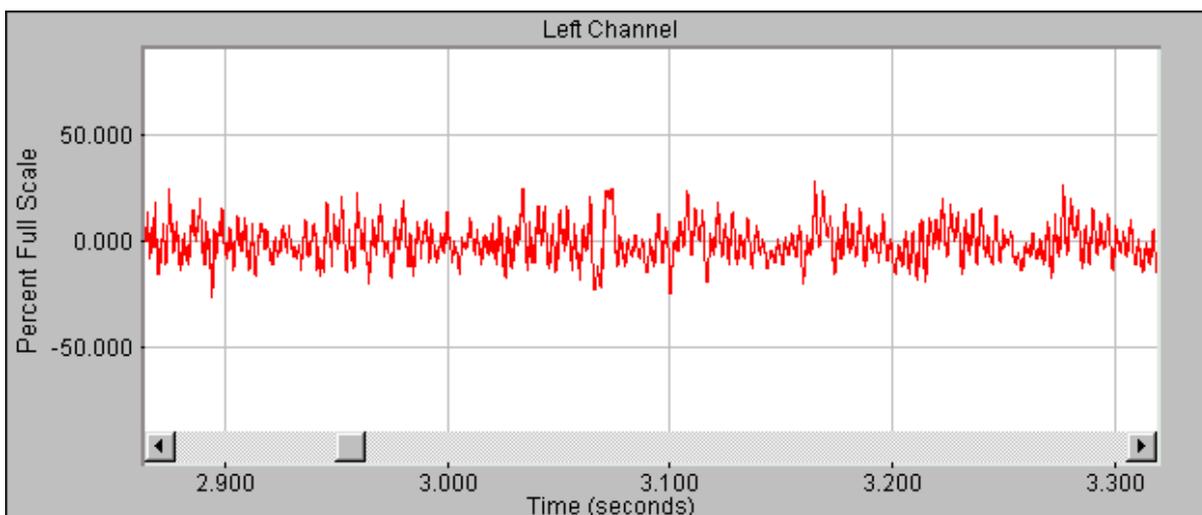


Рисунок Г.10 – Спектрограмма и осциллограмма электродвигателя модели МСП-0,25 с коротким замыканием пластин коллектора

С использованием разработанного программно-аппаратного комплекса была произведена дистанционная диагностика стрелочных электродвигателей по станции Днепропетровск. При диагностировании каждой стрелки производилось четыре её срабатывания. На рис. Г.11 изображена спектрограмма рабочего тока спаренной стрелки, оба электродвигателя находились в исправном состоянии.

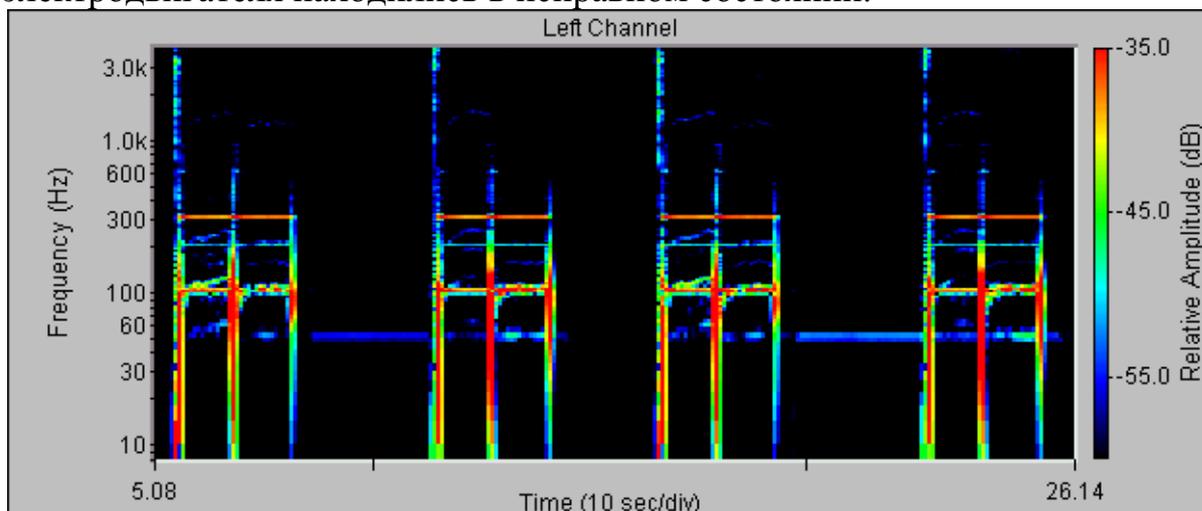


Рисунок Г.11 – Спектрограмма рабочего тока спаренной стрелки при двух исправных двигателях

Неисправность, возникающая в спаренной стрелке, также проявляется в спектре рабочего тока двигателей. На рис. Г.12 изображена спектрограмма рабочего тока спаренной стрелки, при этом на первом двигателе начинает проявляться короткое замыкания пластин коллектора.

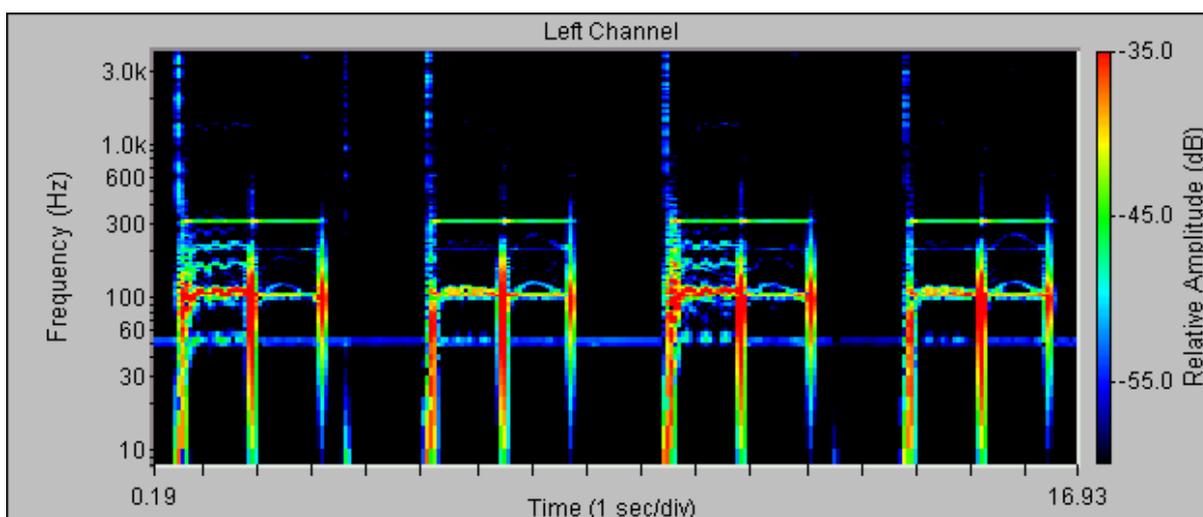


Рисунок Г.12 – Спектрограмма рабочего тока спаренной стрелки, начало короткого замыкания пластин коллектора на первом двигателе