

«Умный локомотив»: диагностирование тяговых электродвигателей тепловозов с использованием методов машинного обучения



И. К. Лакин,
д.т.н., начальник
департамента развития
систем мониторинга тех-
нического состояния локо-
мотивов ООО «ЛокоТех»,
профессор кафедры «Элек-
тропоезда и локомотивы»
Российского университета
транспорта (МИИТ)



В. В. Павлов,
к.ф.-м.н.,
разработчик-математик
ООО «Кlover Групп»



В. А. Мельников,
аспирант кафедры
«Электропоезда
и локомотивы»
РУТ (МИИТ)

Система «Умный локомотив» внедряется в России с 2016 года. Благодаря ее применению можно оперативно отслеживать техническое состояние локомотивного парка, не дожидаясь серьезных поломок и тяжелых ремонтов, экономить ресурсы, прогнозировать неисправности, а в целом – существенно повысить эффективность работы тягового подвижного состава и инфраструктурного железнодорожного комплекса.

Современные локомотивы оснащаются бортовыми микропроцессорными системами управления (МСУ). Это комплекс устройств (рис. 1), состоящий из входов, входных преобразователей сигнала, управляющей стойки, выходных преобразователей сигнала, выходов и блока индикации с собственным запоминающим устройством [1].

Основная функция бортовых МСУ – управление оборудованием локомотивов в процессе их эксплуатации для обеспечения безопасности и поддержания оптимальных режимов работы. Получая преобразованную в дешифруемый сигнал информацию с датчиков (аналоговых, частотных и дискретных), МСУ формирует управляющие сигналы,

которые преобразуются в управляющие воздействия (частотные или дискретные). В большинстве современных МСУ имеется интерфейс взаимодействия с человеком – блок индикации (по сути, штатный промышленный компьютер), оборудованный встроенным модулем памяти [1].

С 2012 г. в сервисных локомотивных депо (СЛД) ООО «ТМХ-Сервис» выполняется считывание с последующей расшифровкой данных МСУ локомотивов в рамках мониторинга их технического состояния [2]. По результатам расшифровки данных МСУ выявляются инциденты. Отметим, что термин взят из стандартов ИТIL, где под термином инцидент подразумевается любой режим работы оборудования, отличный от нормального. Выявленные инциденты делятся на нарушения режимов эксплуатации (НРЭ) и предотказные состояния и заносятся в ERP-систему депо (ТУ-28Э) для принятия мер при заходе локомотивов на ТО или ТР [2]. По итогам 2016 г. подтвержденный экономический эффект от мониторинга по всем СЛД превысил 100 млн руб. в год.

Основной недостаток существующей системы состоит в зависимости качества выявления инцидентов от компетенции оператора – диагноста СЛД. Для снижения влияния диагноста на результат расшифровки с 2012 г. ведутся работы по разработке автоматизированных рабочих мест диагноста (АРМ

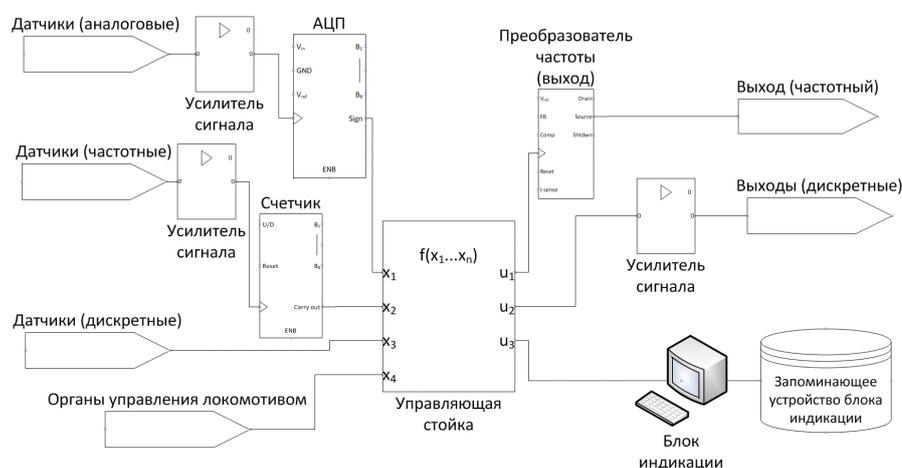


Рис. 1. Принципиальная схема бортовой микропроцессорной системы управления

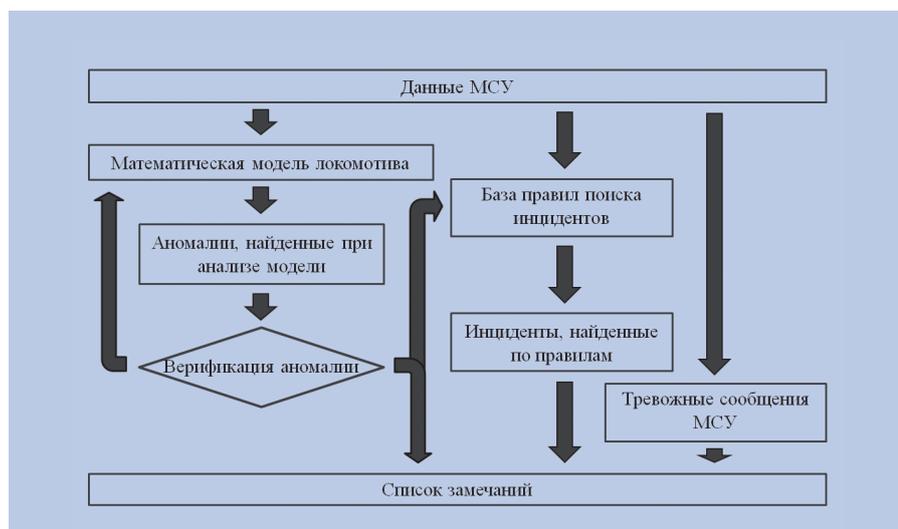


Рис. 2. Алгоритм обработки информации

МСУ) с функцией автоматизированного поиска инцидентов по заданным алгоритмам диагностики. В рамках этих работ созданы АРМ «Осциллограф-3» для тепловозов 2(3)ТЭ116У, ТЭП70БС(У), 2ТЭ70, 2(3)ТЭ10МК(УК), ТЭМ18ДМ и АРМ МСУД для электровозов Э5К, 2(3)ЭС5К, ЭП1М, 2(3)ЭС4К, ЭП2К, что дало возможность частично автоматизировать работу диагностов и повысить объективность проводимого мониторинга.

Однако для введения в АРМ новых алгоритмов диагностики требовалась доработка АРМ МСУ. В результате, по мере накопления опыта диагностики и появления новых видов НРЭ и предотказных состояний вес инцидентов, найденных при помощи алгоритмов, уменьшался и проблема ручного поиска инцидентов появлялась вновь. В последней версии АРМ МСУД она была частично решена за счет внедрения встроенного языка написания алгоритмов диагностики, но написанные с его помощью алгоритмы существовали лишь в локальной версии АРМ и не могли быть распространены на все локомотивы серии.

Развитие вычислительной техники привело к появлению новых методов обработки информации. Например, это методы BigData — алгоритмы, специально созданные для эффективной обработки больших объемов данных, и методы машинного обучения. С помощью указанных методов на основании статистической обработки исторических данных удалось не только выявлять скрытые взаимосвязи, но и определять алгоритмы взаимного влияния параметров.

В 2016 г. ООО «ЛокоТех» совме-

сно с ООО «Кlover Групп» запустило проект АРМ «Умный локомотив» (УЛ), целью которого стал анализ данных МСУ локомотивов методами BigData для выявления скрытых взаимосвязей между параметрами работы оборудования, определения тенденций в их изменении (трендов) и прогнозирования технического состояния. В качестве пилотной серии локомотивов было решено выбрать тепловозы 2(3)ТЭ116У, так как к началу проекта эта серия была достаточно распространена, по ней был накоплен набор диагностических данных, наработан значительный опыт диагностики. В настоящий момент завершается опытная эксплуатация АРМ как по 2(3)ТЭ116У, так и по тепловозам 2ТЭ25КМ и ТЭП70БС.

Данные МСУ локомотивов считываются группами диагностики при заходах локомотивов на плановые виды ТОиР и импортируются на сервер при помощи специально разработанного АРМ «Умный локомотив» (рис. 2). Кроме того, для получения максимального объема данных специалистами групп диагностики и компаний-разработчиков МСУ совместно прорабатывается вопрос стыковки с системами онлайн-мониторинга данных АСК: тепловозы 2(3)ТЭ116У, 2ТЭ25А(АМ,КМ), ТЭП70БС, и БРПД: электровозы 2(3,4)ЭС5К, 2(3)ЭС4К и ЭП2К.

На сервере УЛ с помощью алгоритмов диагностики выполняется первичный анализ данных и их сравнение с показаниями, полученными для аналогичных условий на математической модели оборудования локомотива. Алгоритм обработки информации приведен на рис. 2. Любое отклонение реальных

значений параметров от показаний математической модели признается аномалией — ранее неизвестным режимом работы. Появление алгоритмов диагностики объясняется как потребностью облегчения работы групп диагностики на время обучения и развертывания методов BigData, так и необходимостью выделения инцидентов из нормальных режимов работы локомотива. После обработки данных выявленные с помощью математической модели инциденты направляются на верификацию диагноста. Если диагност подтверждает, что аномалия является инцидентом (в процессе подтверждения указывается и тип инцидента: НРЭ или предотказное состояние, и наименование отказавшего оборудования), то аномалия отправляется на верификацию эксперту и после его подтверждения фиксируется в математической модели как инцидент. В противном случае аномалия фиксируется как нормальный режим работы локомотива.

Инциденты, выявленные при анализе данных, включаются в список замечаний локомотивов. После интеграции УЛ с системой ТУ-28Э между системами организован обмен информацией, при котором инциденты направляются в ТУ-28Э в автоматизированном режиме, а по окончании ремонта данные об отремонтированном и замененном оборудовании импортируются из ТУ-28Э в УЛ для корректировки модели оборудования (фактически модель отремонтированного оборудования «разделяется», чтобы исключить влияние данных до ремонта на ее работу).

По результатам исследования данных выяснено, что при всей гибкости методы машинного обучения обладают рядом специфических требований к обрабатываемой информации:

1) необходима непрерывная информация за длительный период времени; в данных не должно быть участков времени, в которые информация о работе оборудования не поступала;

2) необходим отбор анализируемых параметров; они должны четко разделяться на входные и выходные (модель описывалась по принципу «черного ящика»), причем влияние входов на выходы должно происходить только через описываемый узел;

3) унимодальность описываемого процесса; если в узле имеет место несколько процессов, его нужно разделить на несколько моделей.

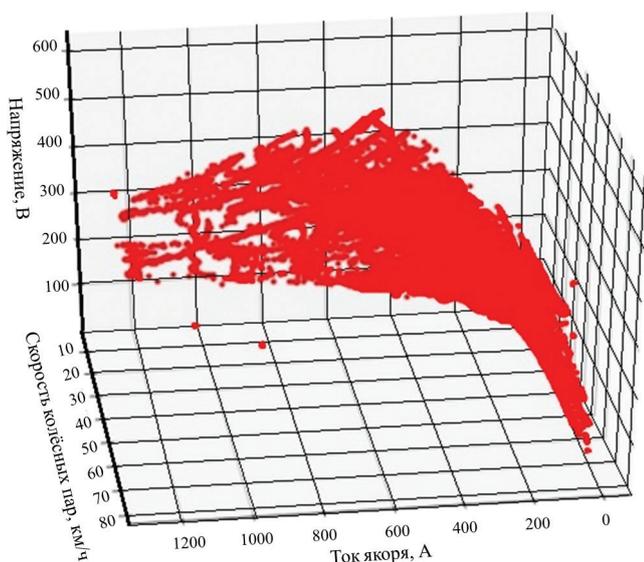


Рис. 3. Зависимость тока ТЭД от скорости колесных пар и напряжения

В качестве первоочередного объекта для моделирования были выбраны тяговые электродвигатели (ТЭД), так как они удовлетворяют сразу нескольким критериям отбора:

- ТЭД стоят достаточно дорого и отказывают достаточно часто (за 2016 г. 20% неплановых ремонтов опытной группы локомотивов были вызваны отказом ТЭД), поэтому их точная диагностика представляет коммерческий интерес для сервисных компаний;
- ТЭД оборудованы достаточным количеством датчиков;
- характеристики ТЭД достаточно подробно описаны как в технической документации, так и в научных трудах.

На основании имеющихся в МСУ параметров была построена модель ТЭД, которая для обеспечения унимодальности (требование 3) сочетала в себе три отдельных модели:

- 1) электрическая модель; зависимость тока от напряжения на зажимах ТЭД в виде, приведенном в таблице;
- 2) электромеханическая модель; зависимость тока ТЭД от скорости колес-

ной пары (схематически модель приведена на рис. 3);

3) модель реостатного торможения; зависимость напряжения на зажимах ТЭД от скорости колесной пары.

Позже в рамках отдельного эксперимента модели (1) и (2) были объединены в одну.

Имеющийся объем данных МСУ не удовлетворяет требованиям обучения модели (даже после подключения данных систем АСК и БРПД), поэтому для обеспечения удовлетворительной точности работы был выполнена дополнительная подготовка данных:

- режимы работы ТЭД были разделены по признаку режима ослабления поля; признак перевода локомотива в реостатное торможение (табл., параметр Блокировка тормозного переключателя ТП. Положение «Тяга») использовался для разделения режимов тяги и реостатного торможения (на рис. 3 нет параметров);
- признаки работы поездных контакторов (табл., параметр Поездной контактор), отключателей моторов (табл., параметр Отключатель моторов ОМ1)

Схема электрической модели ТЭД тепловоза 2(3)ТЭ116У

Входной параметр	Выходной параметр
Выпрямленное напряжение 1 ветви выпрямительной установки	Ток якоря ТЭД1
Реле ослабления поля 1-я ступень	Нет
Реле ослабления поля 2-я ступень	»
Блокировка тормозного переключателя ТП. Положение «Тяга»	»
Блокировка тормозного переключателя ТП. Положение «Тормоз»	»
Поездной контактор 1 ТЭД	»
Отключатель моторов ОМ1	»
Предохранитель 1 ВУУ	»

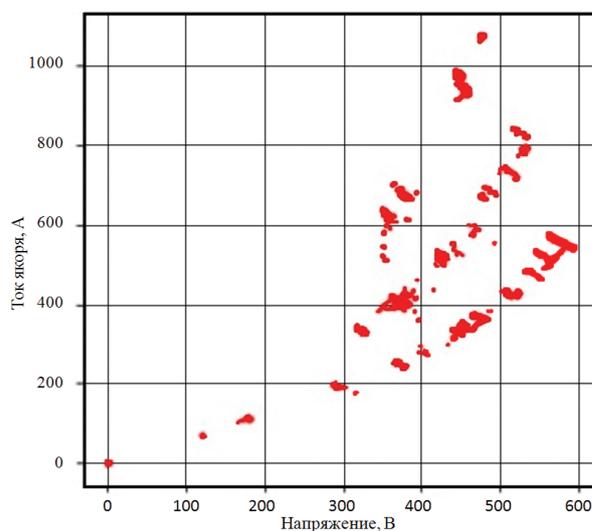


Рис. 4. Ток якоря ТЭД в зависимости от напряжения при фиксированном значении скорости колесных пар (38 км/ч)

и предохранителей (табл., параметр Предохранитель 1 ВУУ) использовались для отсева режимов, в которых ТЭД был отключен;

- с целью борьбы с помехами для всех моделей был выполнен дополнительный отсев участков данных на протяжении 120 с после изменения позиции контроллера (далее ПКМ) или 3 секунд с момента включения/выключения мотор-вентиляторов, а также участков, на которых был включен тормозной компрессор.

При сравнении данных МСУ тепловозов с моделью в процессе выявления аномалий выполняется сортировка данных по аналогичному принципу.

В результате анализа электрической и электромеханической моделей ТЭД установлены особенности в зависимостях напряжения ТЭД от скорости колесных пар и тока ТЭД. В общем случае зависимость этих параметров друг от друга представляет собой гиперплоскость, изображенную на рис. 3 [3].

При фиксированном значении скорости колесных пар зависимость напряжения от тока якоря нелинейная. При больших значениях тока якоря зависимость выходит на насыщение, что связано с работой двигателя в насыщенной области характеристики намагниченности сердечника. Для регулирования частоты вращения двигателя в его электрическую цепь добавляются различные шунтирующие сопротивления, поэтому зависимость напряжения от тока якоря (на рис. 4 зависимость тока якоря от напряжения) при фиксированной скорости колесных пар имеет три кри-

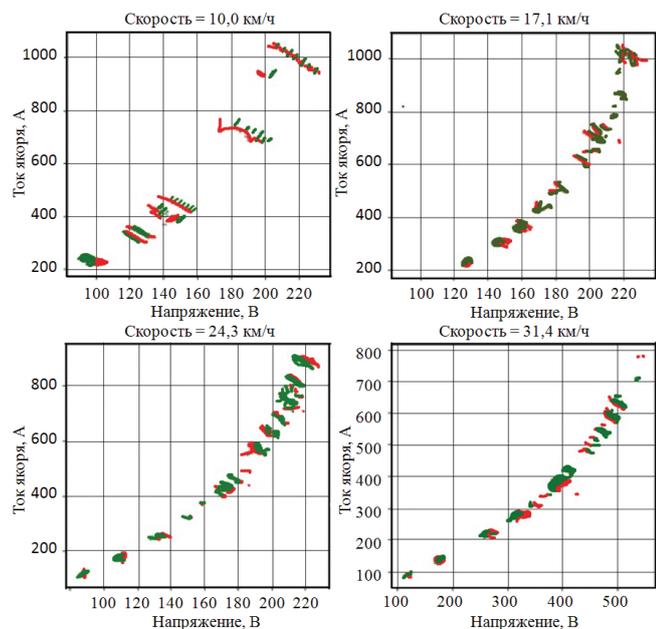


Рис. 5. Сравнение данных, полученных с применением нейронной сети (зеленая кривая), с исходными данными (СКО = 5,2)

вые (рис. 4), что связано с тремя режимами ослабления магнитного потока [3].

Для описания работы ТЭД (2ТЭ116У-80А в режиме полного поля) использовалось построение полносвязной нейронной сети, с помощью которой выполнялось предсказание значений напряжения по току якоря и скорости колесных пар. Результат построения модели и применения ее на тестовых данных представлен на рис. 5. Для оценки качества построения модели использовался показатель среднеквадратического отклонения (СКО) прогнозируемых точек от реальных: чем точнее модель описывает работу ТЭД, тем меньше значение СКО показаний модели от данных МСУ.

В случае применения построенной модели к описанию ТЭД, для которого известно, что было превышено значение тока якоря и нарушено токораспределение, наблюдается плохая предсказательная способность модели (пример приведен на рис. 6). Это позволяет использовать показатель среднеквадратического отклонения для оценки технического состояния ТЭД: для обученной модели чем выше СКО показаний модели от данных МСУ, тем хуже техническое состояние ТЭД.

Таким образом, на основании результатов проведенного исследования можно сделать следующее заключение относительно диагностирования тяговых электродвигателей с применением методов машинного обучения. По причине недостаточной дискретности данных МСУ получение качественной диагностической модели возможно только при ручном отборе контролируемых параметров по принципу их влияния на создаваемую модель. Отсев переходных режимов при создании статической модели позволяет с минимальными трудозатратами получить модель с удовлетворительной диагностической функциональностью. При добавлении отдельной модели можно диагностировать работу локомотива в переходных режимах. Создание единой модели, где учитываются как статические, так и переходные режимы работы, на данном этапе видится нецелесообразным.

Оценить качество обученной модели можно по значению СКО прогнозируемого и реального значения параметров при нормальной работе объекта диагностирования. Аналогичный подход применим для оценки технического состояния диагностируемого узла, но в данном случае за эталон принимаются не данные МСУ, а показания модели.

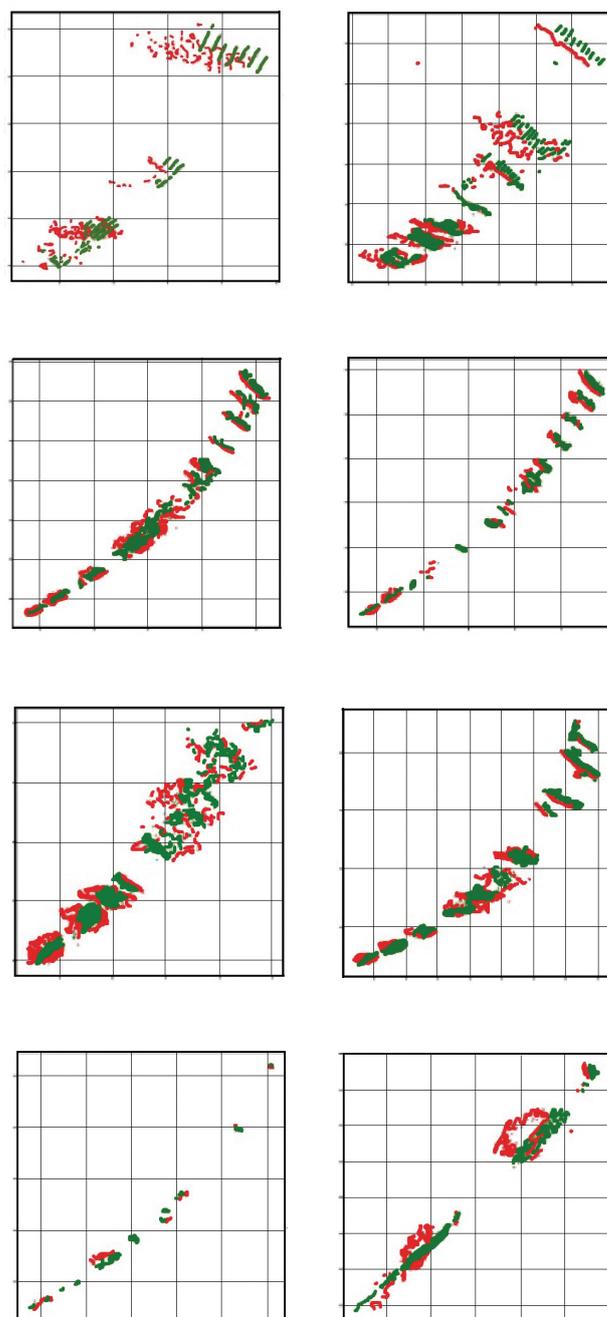


Рис. 6. Сравнение данных, полученных с применением нейронной сети (зеленая кривая), с исходными данными для ТЭД с известной поломкой (СКО = 16)

Литература

1. Патент 2593729 РФ, [МПК]⁷ В 61 L 27/00, 2006.01. Способ контроля режимов эксплуатации локомотивов / Липа К. В., Гриненко А. В., Лянгасов С. Л. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «ТМХ-Сервис»-№ 2015101911/11. Заявл. 22.01.15. Опубл. 10.08.2016. Бюл. № 22. 4 с.
2. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления/ Липа К. В., Гриненко В. И., Лянгасов С. Л. М.: ТМХ-Сервис, 2013. 156 с.
3. Тепловоз 2ТЭ116У: аналит. отчет /Павлов В. В. Казань: ООО «Кlover Групп», 2016. 7 с.