

АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЛОКОМОТИВНЫХ ПРИЕМНЫХ КАТУШЕК АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

А.В. Бородкин

Заместитель начальника отдела Проектно-конструкторского бюро локомотивного хозяйства – филиала ОАО «РЖД» (ПКБ ЦТ ОАО «РЖД»), г.Москва

Аннотация. Техническое диагностирование является неотъемлемой частью системы обслуживания и ремонта железнодорожного подвижного состава, обеспечивающей комплексный контроль наиболее ответственных узлов и агрегатов. Несмотря на постоянное совершенствование системы технического обслуживания и ремонта, ее эффективность напрямую зависит от рисков, создаваемых «человеческим фактором», во многом влияющих на точность и достоверность результатов технической диагностики. Для обеспечения высокой контролепригодности конкретного изделия необходима разработка и внедрение многоканальных информационно-измерительных систем с элементами предиктивной аналитики, позволяющей достоверно определить латентные (скрытые) и детерминирующие (предопределяющие) тенденции и прогнозное состояние контролируемого изделия и функционирующие в составе автоматизированных систем управления (АСУ).

В данной статье рассматриваются актуальность и основополагающие принципы разработки многоканальных измерительных комплексов и формализация базовых требований к многофункциональным системам контроля локомотивных приемных катушек, являющихся первичным звеном рельсоиндуктивной связи автоматической локомотивной сигнализации.

Ключевые слова: локомотивные приемные катушки, контролепригодность, измерительный комплекс, безопасность движения поездов, автоматическая локомотивная сигнализация.

Основой транспортной системы Российской Федерации является железнодорожный транспорт, обладающий огромным перевозочным потенциалом. При этом безусловное обеспечение безопасности движения – незыблемый приоритет Российских железных дорог, который определен Стратегией развития железнодорожного транспорта до 2030 года. [1] Безопасность железнодорожных перевозок обеспечивается в том числе

системами интервального регулирования движения поездов, которые на современном этапе цифровой трансформации железнодорожного транспорта представляют собой системы бесцветной сигнализации, построенные на принципах комплексирования глобального и локального позиционирования, автоматического управления рельсовым транспортом с применением радиоканалов и технологий машинного зрения. Однако по сей день из 85,6 тыс. км эксплуатационной длины магистральных железных дорог России около 63 тыс. км оборудовано автоблокировкой и системой автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) [2; 3], технологические принципы которой были внедрены в середине 50-х годов прошлого столетия. Поэтому на время совершенствования и необходимого перевооружения инфраструктуры отечественных железных дорог на технологически суверенные цифровые технологии классическая парадигма АЛС остается важным элементом обеспечения безопасности движения. Данное обстоятельство не только не обесценивает, но и подчеркивает значимость работ, проводимых в области фундаментальных принципов передачи сигналов с пути на локомотив с использованием рельсовых цепей и направленных на снижение эксплуатационных и ремонтных издержек, свойственных устройствам предыдущих поколений.

Ключевым компонентом системы АЛС, обеспечивающим связь между передающими (путевыми) и приемными (бортовыми) устройствами, выступают локомотивные приемные катушки, содержание которых в технически исправном состоянии является критичным фактором обеспечения безопасности движения.

Существующая система планово-предупредительного ремонта железнодорожного подвижного состава и его составных частей, целью которой является комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на предупреждение прогрессивно нарастающего износа и поддержание оборудования в постоянной готовности к работе, включает в себя, в том числе, регламентированные операции по периодическому контролю измеряемых параметров локомотивных приемных катушек. Традиционный подход к определению технического состояния приемных катушек сводится к экспертной оценке значимости контролируемых опорных характеристик в определенный момент времени. Измеренные величины сравниваются с установленными в конструкторской документации нормативными значениями показателей контролепригодности, в соответствии с которыми принимается суждение о пригодности объекта к эксплуатации. [4] То есть параметрический контроль (проверка соответствия параметров установленным нормам) основан на измерении ряда базовых параметров, которые определяют работоспособность катушки в целом и считаются определяющими. Параметрами, характеризующими состояние приемной катушки, являются ее индуктивность (L), добротность (Q), активное сопротивление (R), сопротивление изоляции ($R_{из}$) и наведенная ЭДС. Проверка данных характеристик проводится

измерительным методом, т.е. при помощи непосредственных измерений соответствующими техническими средствами.

Конструкторской документацией производителей приемных катушек рекомендовано применение следующих измерительных устройств:

– для измерения сопротивления изоляции – мегаомметр с номинальным выходным напряжением 500 В;

– для измерения активного сопротивления и ЭДС вольтметр универсальный, цифровой типа В7-38;

– измеритель иммитанса Е7-15 или Е7-14 - для измерения индуктивности и добротности.

Как видно номенклатура измерительных устройств не лишена недостатков, заключающихся в избыточной функциональности отдельных приборов и как следствие увеличении их габаритов и сложности управления, а также необходимости применения различных измерительных кабелей при смене измеряемого параметра. В соответствие с чем технологическая продолжительность и трудоемкость работ, затраченных на вспомогательные операции, составляет не менее 60-80% от общего времени диагностирования катушек. Для сокращения времени на проведение измерительных операций необходимо параллельное проведение измерений нескольких характеристик. Наиболее распространенным комплексным средством измерения, позволяющим провести последовательное диагностирование практически по всем необходимым параметрам, является допустимый к применению руководством по эксплуатации локомотивных приемных катушек [5] измеритель параметров ИП-ЛК. [6]

Данный прибор позволяет, в том числе, производить измерение сопротивление изоляции. Эксплуатация приемных катушек под влиянием значительных механических нагрузок может привести к механическим напряжениям в конструктиве катушки и последующему разрушению изоляции с уменьшением ее сопротивления ($R_{из}$). Температурное расширение проводов из-за климатического непостоянства также может привести к ускорению процессов старения и разрушения изоляции катушки. Возможное проникновение в катушку влаги, в свою очередь также способствует уменьшению сопротивления изоляции и может вызвать замыкание между витками в слое, а ее замерзание способствует замыканию проводов, их обрыву или шунтированию части витков. Для выяснения степени повреждения и допустимости дальнейшей эксплуатации катушки проводится измерение ее сопротивления изоляции. При проведении данной измерительной операции, в соответствии с требованиями [7] необходимо подать постоянное напряжение на голую жилу вывода катушки, чем определяется отношение поданного напряжения к величине тока утечки. Чем хуже изоляция, тем значение $R_{из}$ ближе к нулю и тем больший ток утечки.

Поэтому при вращении рукоятки динамо-машины механического аналогового мегаомметра вырабатывается высокое напряжение, с помощью которого и измеряется сопротивление изоляции на измеряемом участке. При использовании ИП-ЛК величина подаваемого в измеряемую цепь напряжения составляет всего 5 В, что явно недостаточно и не позволяет определить степень изношенности изоляции и соответственно предупредить неожиданные и нежелательные случаи короткого замыкания обмотки катушки.

Особенностью приемной катушки является значительная величина индуктивности, которая определяет величину наведенной ЭДС, характеризующей уровень принятого сигнала. Согласно своей документации, прибор ИП-ЛК обеспечивает измерение индуктивности и добротности на тестовой частоте 75 Гц при напряжении 1 В. Разработчик приемных катушек при этом регламентирует производить измерение данных параметров на частоте 100 ± 1 Гц. Выбор данного значения объясняется тем, что основой многих цифровых приборов прошлого поколения, предназначенных для измерения параметров электрических цепей, является использование мостовых методов, что сопровождается заметным усложнением их схемотехники и автоматизации процессов уравнивания. Такие приборы могут работать только на фиксированных частотах, а у большинства рекомендованных измерителей иммитанса наиболее близкой к рабочим частотам автоматической локомотивной сигнализации (25, 50, 75 и 175 Гц, выбираемой в зависимости от вида тяги поездов и рода тягового тока) является частота тестового сигнала 100 Гц. Например:

- Е7-14М имеет программируемый по 8-ми точкам тестовый сигнал в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц (100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 20 кГц, 30 кГц, 60 кГц, 100 кГц);
- для Е7-14 частота измерения: 100 Гц, 1 и 10 кГц;
- для Е7-15 частота измерения: 100 Гц и 1 кГц;
- для Е7-15М частота измерения: 100 Гц, 120 Гц, 1 кГц.

Соответственно применение ИП-ЛК для измерения индуктивности не может гарантировать достоверности значений контролируемых параметров. Экспериментальные измерения индуктивности, проведенные измерителем иммитанса на 100 Гц и ИП-ЛК при 75 Гц, показали, что разница полученных значений из-за отличия тестовой частоты может достигать 1 Гн. Поскольку существует указанная зависимость, то контроль достаточно сложной и характеризуемой множеством факторов непредсказуемого влияния величины индуктивности, целесообразно проводить при частоте колебаний источника питания, соответствующей рабочему режиму АЛС. Справедливости ради необходимо отметить, что выпускаемые еще в СССР приборы Е7-14 и Е7-15 сильно устарели и их выпуск прекращен. В настоящее время возможности и

достижения науки, техники и технологий позволяют создавать более совершенные решения, построенные на самой современной аппаратной базе, позволяющей реализовать устройства измерения с динамическим диапазоном рабочей частоты. Например, измеритель иммитанса Е7-20 [4] или созданный на его основе портативный вариант – прибор Е7-25, имеют регулируемый от 25 Гц до 1 МГц диапазон установки тестовой частоты. Однако сравнительная стоимость подобных устройств требует оптимизации применяемых технических средств диагностирования. Исходя из приведенных доводов производитель приемных катушек в своей документации указывает, что при проверке основных электрических параметров (сопротивление, индуктивность, добротность) с использованием ИП-ЛК окончательное решение о пригодности катушки необходимо принимать по результатам последующей перепроверки с использованием более точных приборов.

Таким образом при внешней простоте существующего подхода диагностирования технического состояния локомотивных приемных катушек, его практическая реализация не исключает как условную вероятность ложного отказа (повреждения) – вероятность того, что исправная катушка в результате диагностирования признается как имеющая повреждение или отказ и принимается неисправной, так и вероятность необнаруженного отказа (повреждения), при котором неисправная (неработоспособная) катушка в результате контроля признается исправной или работоспособной. [8] Кроме того, в современной практике анализа сложившийся метод проведения контроля не обеспечивает объективности технического диагностирования катушек как минимум потому, что при отсутствии базовых библиотек эксплуатационных параметров запись информации и экспертная оценка осуществляются вручную, а основной задачей определения технического состояния катушки является установление значений контролируемых параметров в текущий момент времени, исключая при этом вопросы прогнозирования состояния локомотивных катушек с заданной вероятностью на предстоящий интервал эксплуатации.

В связи с чем, вопрос трансформации бумажной технологии учета технического состояния катушек в перспективную цифровую модель [9] посредством разработки концептуально новых методов, методик, алгоритмов и средств диагностирования, предназначенных для сбора и первичной обработки информации с высоким быстродействием и логической интерпретацией значений контролируемых параметров, особенно важен и должен служить предметом специальных исследований. [10]

Перспективы развития систем диагностирования лежат в области обеспечения многоканальных параллельных измерений. В отличие от традиционного множества приборов для контроля технического состояния локомотивных приемных катушек, предлагаемый к разработке аппаратно-

программный комплекс является многофункциональным средством измерений, позволяющим при сравнительно простой аппаратной реализации избавиться от сложных и громоздких коммутирующих устройств и, тем самым, существенно уменьшить габариты устройства. [11] Возможность автоматизации измерений как отдельных этапов контроля качества приемной катушки и цифровая обработка результатов позволят значительно сократить время, необходимое для проведения измерительных операций, а также снять или существенно ослабить ограничения по условиям их проведения и обеспечить необходимую точность. [12]

Принцип функционального разделения измерителя на программную и аппаратную части позволит сделать рациональный выбор и конфигурацию электронно-компонентной базы для решения широкого круга измерительных задач, сохраняя при этом компактность комплекса, а гибкость программного обеспечения определяет его многофункциональность. Оценка прецизионности (свойство, характеризующее отклонения реальных параметров от заявленных) при параметрическом контроле, а также множества факторов, характеризующих условия проведения измерений, может быть получена в результате применения математических и схемотехнических моделей и соответствующих программных инструментов. В соответствие с чем, после определения функциональных и технических требований, предъявляемых к измерительному комплексу, целесообразна разработка его программно-математической модели, позволяющей путем вычислительного эксперимента имитировать параметрический контроль процесса измерений (оценка качества и эффективность технологического процесса на основе измерения определенных параметров), с концептуальной проработкой аппаратной реализации. [13]

Анализ отечественного и зарубежного опыта в области электротехники и разработки аппаратно-программных измерительных устройств позволяет сформулировать основные требования к их построению, которые для обеспечения новаторских возможностей измерений и гибкости системы должны отвечать приведенным ниже условиям. [14; 15]

- высокая производительность – за счет применения современной архитектуры и последних технологий в области компонентной базы, обеспечивающих широкие возможности параллельного контроля;

- компактность и адаптивность, достигаемая посредством совокупности параллельных программно-аппаратных измерительных каналов, на вход которых через многоразрядный мультиплексор подаются сигналы от различных источников;

- возможность одномоментного измерения нескольких компонент, что позволит получить максимум измерительных возможностей при минимальном времени контроля и затратах на изготовление измерительной оснастки;

- единая линия периферийного интерфейса для проведения инвариантных измерений;
- обеспечение функциональности измерителя только в рамках требуемых измеряемых параметров;
- предельно простое управление и использование в условиях эксплуатации;
- многофункциональность и гибкость, реализуемая программной составляющей, которая не должна иметь ограничений по длительности измерений и объему получаемых данных и обеспечивать возможность модификации сценариев проводимых измерений во время их исполнения;
- простота создания тестовых последовательностей;
- обеспечение дискретизации измеренных величин по времени и преобразование в цифровой код;
- математическая многовариантная обработка и сохранение результатов измерений в специальной базе данных с целью их последующей визуализации как в текстовом, так и в графическом формате (так называемый режим осциллографа);
- построение амплитудных и площадных спектров допустимых значений контролируемых параметров, а также выделение на спектрограмме области измеренных величин;
- обработка измеренных данных в соответствии с формализованными алгоритмами и выявление корневых причины возможных неисправностей приемных катушек, которые не всегда лежат на поверхности, а могут быть скрыты, например, в нарушениях технологии обслуживания, применении несоответствующих материалов и запасных частей, сложной фоноцелевой обстановкой (эксплуатация в достаточно жестких условиях, создаваемых внешней средой);
- получение результатов измерений через удаленный доступ по локальной сети или через интернет.

Предлагаемое решение подразумевает, что конечный пользователь имеет возможность как получить автоматически проанализированный результат измерений технико-эксплуатационных характеристик катушек в конкретный момент времени, так и проанализировать тенденцию их деградиационного старения по базе ранее измеренных значений, выстроенных в когнитивно-визуализированную зависимость, отображаемую в виде числовых значений, изменяющихся точечных данных, графической панели или текста. Это способствует наглядному воспроизведению и достоверному индивидуальному прогнозированию тенденций состояния приемной катушки, и оперативному принятию адекватных решений по допуску ее в эксплуатацию.

В зависимости от требуемых задач, удаленные пользователи посредством сетевого доступа через Ethernet или по каналам GSM, либо Wi-Fi связи, могут подключаться к системе сбора данных, вычислительному кластеру комплекса, а также к рабочим местам внешнего контура системы диагностики. Это позволяет организовывать быстрый доступ к архивам данных, а также, при необходимости, синхронизировать копии архивов для последующей обработки данных на местах. [10] Соответственно в данном решении добавляется возможность «бесшовной» интеграции технической диагностики в автоматизированные информационные системы управления, учета и контроля технических средств железнодорожного подвижного состава. Интеграционные процессы, протекающие относительно информационного взаимодействия отраслевых автоматизированных систем, позволяют вывести техническую диагностику на принципиально новый уровень, предусматривающий решение широкого круга задач по формированию из разрозненных информационных ресурсов единого информационного пространства и цифровую интероперабельную инфраструктуру (классификаторы, нормативно-справочная информация (НСИ), унифицированные формы документов, электронный словарь терминов и т.п.) для деятельности и функционирования всех участников перевозочного процесса. Соответственно потенциал разработки и внедрения комплекса имеет большие перспективы в будущем, в части интегрирования в научно-технические проекты «Цифровое депо», «Умный локомотив» и различные интеллектуальные системы диагностики АЛС, а также позволит создать дополнительный инструмент в теории управления техническим состоянием подвижного состава и организации работы ремонтного персонала.

Список использованных источников

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г., утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 № 877-р.
2. [Электронный ресурс] // «Российские железные дороги» : [официальный сайт]. — URL: <https://www.rzd.ru> (дата обращения 01.10.2024).
3. Юсупов Р.Р. О снижении влияния помех от линий электропередачи на функционирование канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа / Р.Р.Юсупов, А.С.Хохрин // Вестник ВНИИЖТ. 2024. Т. 83, №1. С. 70–80.
4. MIL-HDBK-2165. Testability handbook for systems and equipment // Department of Defense, Washington, 1995.
5. Катюшка приемная КП. Руководство по эксплуатации АГБР.060.00.00РЭ. – 58 л.
6. Измеритель ИП-ЛК. Руководство по эксплуатации. КМСИ.411252.026 РЭ.

7. ГОСТ 3345-76. Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления изоляции : Межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 23.06.76 г. № 1508 : взамен ГОСТ 3345-67 : дата введения 01.01.78 : издание официальное с изменениями № 1, 2, утвержденными в сентябре 1981 г., июне 1988 г. (ИУС 11-81, 10-88) / Разработан и внесен Министерством электротехнической промышленности СССР. -22 с. - Текст : непосредственный.

8. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 26.12.89 № 4143 : взамен ГОСТ 20911-75 : дата введения 1991-01-01 : переиздание Ноябрь 2009 г. / Разработан и внесен Государственным комитетом СССР по управлению качеством продукции и стандартам, Министерством автомобильного и сельскохозяйственного машиностроения СССР, Академией наук СССР, Министерством высшего и среднего образования РСФСР, Государственной комиссией Совета Министров СССР по продовольственным закупкам. – Москва : ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2009. -13 с. - Текст : непосредственный.

9. Поморцев В.А. Информатизация локомотивного комплекса в рамках концепции «Цифровая железная дорога» / Поморцев В.А. // Вестник СамГУПС. 2019. №1 (43). – С.118-123.

10. Попов Ю.В. Контролируемость, контролепригодность. / Попов Ю.В. // Тенденции развития науки и образования. 2020. №66-2. С. 35-42.

11. Светлов А.В. Аппаратно-программный комплекс для измерения параметров электрических цепей / Светлов А.В., Ушенина И.В. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. № 1, 2008. Технические науки. Электроника, измерительная и радиотехника. – С. 81-89.

12. Паршуков М. Ю. Принципы построения аппаратно-программных комплексов для формирования и измерения параметров импульсных сигналов / Паршуков М.Ю, Светлов А.В., Ханин И.В., Мишра П. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3 (11). – С. 102–112.

13. Атрохов В.Н. Математическая модель измерительного комплекса для определения внешних параметров вибраторных активных фазированных антенных решеток в ближней зоне / Атрохов В.Н., Литвинов А.В., Мищенко С.Е., Шацкий В.В. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №4. — URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.4.2> (дата обращения 26.02.2025).

14. Мартяшин А.И. Перспективные направления развития измерителей параметров многоэлементных электрических цепей / Мартяшин А.И., Светлов А.В. // Актуальные проблемы науки и образования : труды междунаро.

Юбилейного симпоз. : в 2-х т. – Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ, 2003. – 2 т. – С. 288–290.

15. Моисеев В.В. Измерительный комплекс для экспресс-контроля параметров приемных катушек автоматической локомотивной сигнализации / Моисеев В.В., Тюпин С.В. // Описание изобретения к патенту. Дата регистрации: 04.08.2017 (RU) (73). Патентообладатель(и): Открытое акционерное общество «Российские железные дороги».