

621.313.2.014:621.33

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗА

*Д-р техн. наук, проф. Ш. К. ИСМАИЛОВ, д-р техн. наук, доц. В. П. СМИРНОВ, д-р техн. наук, проф.
А. М. ХУДОНОВ*

Рассмотрена проблема повышения функциональной надежности электровоза. Решением ее служит введение многомерной системы контроля и регулирования температуры предельно нагруженного оборудования, соответствующей принципам многомерности, непрерывности и многоуровневости. На основе анализа методов и средств контроля температуры проведено обоснование выбора датчиков температуры и предложены конкретные методы измерения.

The problem of increase functional reliability of an electric locomotive was examined. The solution is an introduction of a multivariate monitoring system and a temperature regulation of the extreme loaded equipment which is satisfying the principals of multidimension, continuity and multiplity. On a basis of metod's and means temperature control analyses, the substation of a control ganges choise was carried out and concrete methods of measurement were offered.

К концу 70-х гг. прошлого столетия был практически исчерпан резерв повышения мощности коллекторных электрических машин (ЭМ) постоянного тока, в частности тяговых электродвигателей (ТЭД) магистральных электровозов. В то же время необходимость повышения массы грузовых поездов с целью увеличения провозной и пропускной способности железных дорог и скорости пассажирских поездов в конкурентной борьбе с авиационным транспортом требовала дальнейшего увеличения мощности электровозов и интенсивности их использования. При создании электровозов нового поколения увеличенной мощности с асинхронным тяговым электроприводом повышается актуальность разработок систем контроля и стабилизации температуры предельно нагруженного оборудования. Уже на первых опытных электровозах ЭП10 в обмотках ТЭД установлено несколько датчиков температуры [1].

Не менее важно обеспечивать контроль и стабилизацию температуры на используемых в настоящее время электровозах переменного тока. На сети железных дорог, электрифицированных по системе переменного тока (около половины электрифицированных дорог страны), эксплуатируются грузовые электровозы нескольких типов: ВЛ60^К, ВЛ80^К, ВЛ80^Т, ВЛ80^С, ВЛ80^Р, ВЛ85 [2]. Срок их эксплуатации составляет от 10 до 35 и более лет. Выпуск новых грузовых электровозов прекращен и в ближайшие 10—15 лет предполагается эксплуатация имеющегося в настоящее время парка электровозов без пополнения новыми локомотивами. Это в наибольшей мере касается Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД) — филиала ОАО «РЖД», почти полностью электрифицированной по системе переменного тока, электровозы которой, работая на крутых (17 % и более) и протяженных расчетных подъемах, имеют нагрузку, которая на 15—25 % превышает нагрузку электровозов остальной сети электрифицированных железных дорог страны.

В настоящее время на Улан-Удэнском локомотивовагоноремонтном заводе ВСЖД производится переоборудование электровозов ВЛ80^Т, ВЛ80^С при выполнении капитального ремонта с продлением срока эксплуатации (КРП). Модернизированные электровозы ВЛ80^М оборудованы современными микропроцессорными системами управ-

ления с выводом данных об основных параметрах работы электровоза на мониторы, расположенные на пультах управления. Как показал опыт эксплуатации электровозов ВЛ80^М депо Вихоревка ВСЖД, в подталкивающем движении слабым «звеном» электровоза является отсутствие информации о температуре основного предельно нагруженного оборудования, хотя при проведении КРП на электровозе ВЛ80^М вполне возможна установка системы непрерывного контроля температуры.

Анализ надежности оборудования электровозов ВСЖД показывает, что на долю ТЭД приходится более одной пятой отказов. По мере увеличения срока эксплуатации наблюдается рост повреждений ТЭД, а использование электровозов с вышедшим из строя хотя бы одним двигателем запрещается. Средняя стоимость устранения отказа двигателя в несколько раз превышает стоимость устранения повреждения других видов оборудования. Ущерб от задержек поездов при повреждениях двигателей значителен. Две трети неисправностей ТЭД вызваны пробоями изоляции обмоток. Испытания показали, что нередко это обусловлено чрезмерным превышением скорости их нагрева из-за значительной неравномерности нагрузки оборудования, а также снижения расхода охлаждающего воздуха существенно меньше допустимых значений. Тепловое и термомеханическое старение изоляции обмоток полюсов, якоря двигателей электровозов, эксплуатируемых на ВСЖД, ускоряется из-за значительных колебаний нагрузки при следовании поезда по горно-холмистому профилю дороги, с частыми подъемами и спусками.

Данные о распределении отказов электровозов переменного тока на ВСЖД по видам оборудования приведены в таблице.

Из анализа данных таблицы видно, что имеет место достаточно стабильное распределение отказов разных видов оборудования по годам эксплуатации. Наибольшее число отказов оборудования электровозов приходится на электрические аппараты, ТЭД и асинхронные вспомогательные электрические машины (АВЭМ).

В практике эксплуатации локомотивов на отдельных дорогах для повышения производительности широко используется один из экономических принципов — увеличение среднего веса поездов. В результате часто вес поезда превышает критические возможности локомотивов, а следовательно, резко сокращается срок службы узлов, в первую очередь — тяговых электродвигателей, колесных пар, электроаппаратуры. Тяговый подвижной состав, обладая определенным запасом надежности, сразу из строя не выходит, а накапливает неисправности, которые в дальнейшем приводят к массовым повреждениям. В настоящее время парк локомотивов предельно изношен. Восстановительные работы в требуемых объемах и в соответствии с разработанными технологиями ремонта не проводятся, своевременно не осуществляется текущее содержание, локомотивы работают с запредельными нагрузками, в результате — массовый выход из строя ТЭД и ВЭМ по причине электрического пробоя и межвиткового замыкания обмоток главных (ГП), дополнительных (ДП) полюсов, компенсационной обмотки (КО), обмотки якоря, повреждение выводов катушек и кабелей.

Результаты исследований надежности предельно нагруженного оборудования (механического и электрического) свидетельствуют о необходимости ввода бортовых систем контроля аппаратуры, дающих информацию о тепловом состоянии каждого вида оборудования непосредственно в условиях эксплуатации и обеспечивающих благодаря этому более полный и точный диагноз и прогноз состояния оборудования и принятия тех или иных мер. Один из путей повышения функциональной надежности электровоза в целом — это введение такой системы температурного контроля предельно нагруженного оборудования, которая соответствует принципам многомерности (многоточечности), непрерывности и многоуровневости. В данном случае *принцип многомерности* предполагает контроль температуры нескольких наиболее «уязвимых» узлов и элементов:

Распределение отказов электровозов ВСЖД по видам оборудования

Вид оборудования	Год	
	1999	2000
	$m_i, \%$	
Электрическая аппаратура	30,8	30,3
Тяговые электродвигатели	20,5	19,9
Асинхронные вспомогательные электрические машины	14,4	12,8
Колесные пары	8,2	8,1
Механическое оборудование	7,1	7,3
Автотормозное оборудование	3,4	3,9
Приборы безопасности	4,3	4,7
Прочее оборудование	13,4	13,1

Примечание. В таблице частота m_i — $N_i/\Sigma N \cdot 100$, где N_i — количество отказов и повреждений одного вида оборудования; ΣN — общее количество отказов и повреждений.

ТЭД-якоря, ГП, ДП, КО; моторно-якорных и моторно-осевых подшипников; сглаживающих реакторов (СР) и обоих выводов из СР; выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИПов) — наиболее нагруженных и наименее охлаждаемых тиристоров; асинхронных ВЭМ-статорных обмоток, ротора и подшипников. *Принцип непрерывности* предполагает непрерывный или дискретный, с достаточным периодом по времени, объективный контроль температуры лимитирующих элементов оборудования. Это позволит получать своевременную информацию о перегреве оборудования и адекватно реагировать на нее. Защитная аппаратура позволяет избежать повреждения или ускоренного износа (старения) оборудования во всех эксплуатационных условиях, в том числе и в тех, когда температура нарастает до критического значения в течение десятков секунд и менее. *Многоуровневость* системы дает локомотивной бригаде возможность выполнить прогноз нарастания температуры во времени и принять объективные решения о последующих действиях, позволяющих исключить сбой движения поездов, особенно на лимитирующих перегонах с расчетными подъемами, при сохранении оборудования электровоза в работоспособном состоянии.

Анализ методов и средств контроля температуры показал, что в условиях эксплуатации предельно нагруженного оборудования электровозов переменного тока наиболее предпочтительными датчиками температуры являются металлические термосопротивления с линейной характеристикой изменения сопротивления от температуры, полупроводниковые термосопротивления с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и термосопротивление с положительным ТКС (позисторы). Можно также использовать диоды, транзисторы в режиме диода и биметаллические реле-регуляторы. Для контроля температуры обмотки якоря ТЭД наиболее эффективен метод косвенного измерения его температуры по температуре компенсационной обмотки. При измерении температуры моторно-якорных подшипников (МЯП) ТЭД, СР, ВИПов, статорной обмотки, железа статора, подшипников асинхронных ВЭМ может быть использован метод непосредственного измерения.

В настоящее время элементы многомерной системы непрерывного контроля температуры введены на электровозах ВЛ80^Т (ТЭД и СР) и ВЛ85 (МЯП, ТЭД, СР, буксовые подшипники колесных пар), функциональные схемы температурного контроля которых представлены на рис. 1.

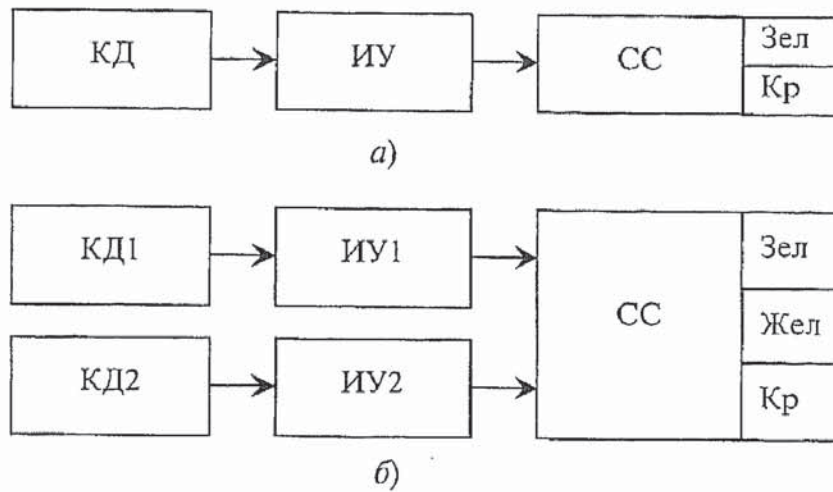


Рис. 1. Функциональные схемы температурного контроля: а — двухуровневая, б — трехуровневая

Комплексом датчиков (КД) (позисторов) вырабатываются сигналы, соответствующие температуре объекта (рис. 1, а). Информация от КД поступает на вход измерительного устройства (ИУ) и устройство встроенной температурной защиты (УВТЗ), являющееся пороговым устройством превышения уровня температуры. Пока температура контролируемых объектов находится на допустимом уровне, суммарное сопротивление последовательно включенных позисторов одного УВТЗ не превышает образцового значения. При этом в схеме сигнализации (СС) горит лампа зеленого цвета — Зел. Превышение температуры одного из объектов контроля вызывает рост сопротивления позистора. Тогда суммарное сопротивление позисторов УВТЗ достигает установленного порогового значения, оно срабатывает, а в схеме сигнализации загорается лампа красного цвета (Кр). При этом локомотивная бригада обязана устранить причину перегрева того или иного вида оборудования за счет уменьшения тока нагрузки, отключения ТЭД либо силового блока (СБ) в целом (в комплект которого входят два ТЭД, СР и ВИП), если это возможно по поездной обстановке, либо значительно увеличив интенсивность вентиляции (увеличение объема охлаждающего воздуха и его статического напора).

В трехуровневой системе (рис. 1, б) функциональная схема температурного контроля оборудования (КД1, ИУ1 и СС) состоит из двух этапов: первого, когда загорается лампа желтого цвета (Жел), и второго, на котором контролируется предварительный перегрев ($t_{\text{пр}} = t_{\text{доп}} - 15 \text{ }^\circ\text{C}$). На втором этапе задействованы комплекс датчиков (КД2), измерительное устройство (ИУ2) и схема сигнализации, загорается лампа красного цвета (Кр), которая информирует локомотивную бригаду об увеличении температуры одного из объектов до предельно допустимого значения.

Современная электронная техника позволяет создавать разновариантные системы контроля температуры. Возможно исполнение системы на интегральных микросхемах (ИМС) малой и средней степени интеграции по архитектуре жесткой (неизменной) логики. Компоненты устанавливаются на печатные платы, а элементы плат соединяются в соответствии с реализуемым свойством функционирования. Возможно создание системы температурного контроля и на основе микропроцессорных комплектов или однокристальных ЭВМ. При реализации необходимых пороговых функций необходимы программные средства, без которых микропроцессорная система неработоспособна. Учитывая сложные условия эксплуатации и уровень развития электрического оборудования, особенно на электровозах переменного тока, наиболее целесообразным представляется создание системы контроля температуры с автоматической жесткой логикой с использова-

нием ИМС малой и средней степени интеграции. В этой системе должны применяться электронные компоненты марок и серий, показавших высокую надежность при эксплуатации на электровозах.

Элементы микроконтроллерной системы, работающей по принципу автомата железной логики, реализованы в блоке температурного контроля (БТК) тяговых электродвигателей электровоза ВЛ85 (рис. 2), опробованном и испытанном в лабораторных и эксплуатационных условиях.

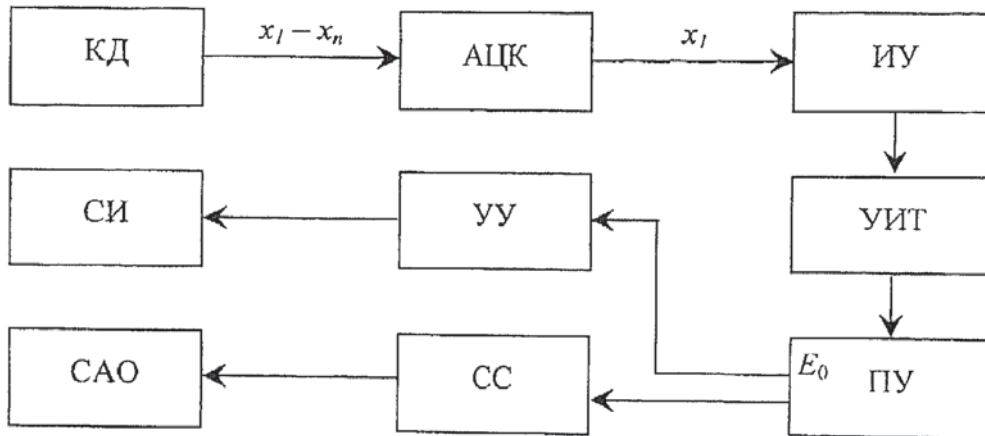


Рис. 2. Функциональная схема температурного контроля

Комплексом датчиков (транзисторов, включенных по схеме диода) КД вырабатываются сигналы, соответствующие температуре объекта. По каналам связи информация от датчиков поступает на вход электронного аналогово-цифрового коммутатора (АЦК), выполняющего их упорядоченный временной опрос. Выходной сигнал из АЦК — совокупность квантованных по времени входных сигналов — поступает на вход мостового термоизмерительного устройства (ИУ). В ИУ сигналы усиливаются и поступают на устройство индикации температуры (микроамперметр) (УИТ) и далее на пороговое устройство (ПУ) превышения уровня температуры (элемент И-НЕ). В ПУ происходит уровневая (амплитудная) оценка значений составляющих выходного сигнала из АЦК. Процесс повторяется циклически до тех пор, пока какая-либо составляющая не превысит заданное в ПУ образцовое значение. Это происходит при увеличении температуры ТЭД до предельно допустимого значения. В этот момент времени ПУ вырабатывает сигнал остановки временного опроса E_0 для цифрового устройства управления (УУ) аналогово-цифрового коммутатора. Устройство управления останавливает процесс квантования, соединяя датчик, установленный на ТЭД с повышенной температурой, через АЦК с пороговым устройством. Одновременно ПУ активизирует узел звуковой и световой сигнализации (СС) и устройство выдержки времени отключения, т. е. схему аварийного отключения (САО), которая начинает отсчет времени до отключения линейного контактора или быстродействующего выключателя предаварийного ТЭД. При остановке АЦК схема индикации (СИ) информирует локомотивную бригаду о номере перегретого ТЭД. Локомотивная бригада, получив информацию о перегреве двигателя, принимает решение об устранении причин его возникновения. При отсутствии адекватной реакции от локомотивной бригады и температуре ТЭД выше предельно допустимой по истечении установленного времени задержки САО произведет отключение перегретого двигателя. При снижении температуры у отключенного ТЭД ниже допустимой система разрешает его повторное включение.

Элементы микроконтроллерной системы с использованием в качестве датчиков температуры термосопротивлений с отрицательным ТКС типа ММТ-1 реализованы в опытном образце температурного контроля ТЭД и СР секции электровоза ВЛ85 (рис. 3).

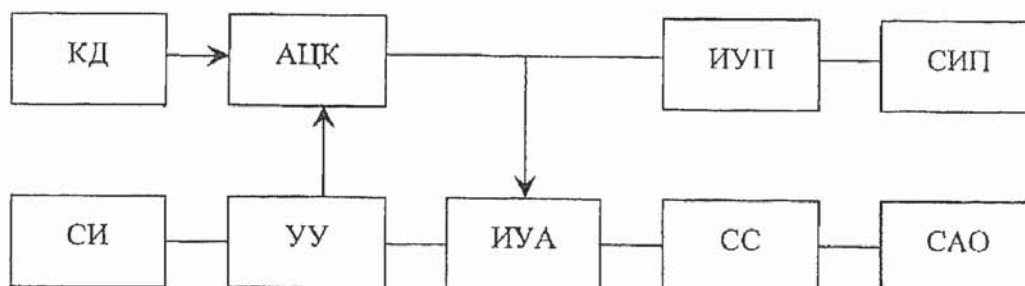


Рис. 3. Функциональная схема системы температурного контроля ТЭД и СР

В данной функциональной схеме выходной сигнал АЦК $V_{кв}$ поступает на вход измерительного устройства (компаратора) предварительного нагрева (ИУП) ($t_{пр} = t_{доп} - 20$ °С). Производится сравнение $U_{ов}$ с образцовыми значениями напряжения $U_{пр ТЭД}$ и $U_{пр СР}$. Процесс повторяется до тех пор, пока температура одного из ТЭД или СР (например, ТЭД № 1) не возрастет до $t_{пр}$. При этом напряжение первой составляющей $U_{кв}$ станет меньше $U_{пр ТЭД}$, что вызовет зажигание светодиода ТЭД 1 на индикационной линейке схемы информации о предварительном нагреве (СИП). При увеличении температуры ТЭД или СР до $T_{доп}$ измерительное устройство аварийного нагрева (ИУА) подает сигнал через устройство управления на АЦК.

При этом, как и в схеме с блоком температурного контроля ТЭД электровоза ВЛ85, прекращается опрос всего комплекса датчиков и СИ и СС подают световой сигнал и показывают вид и номер перегретого оборудования, а схема аварийного отключения начинает отсчет времени на его аварийное отключение.

Анализ методов, средств и систем регулирования температуры показал, что в условиях эксплуатации электровозов переменного тока наиболее приемлемыми являются следующие системы регулирования температуры коллекторов тяговых электродвигателей. Во-первых, двухпозиционное одноконтурное регулирование по контуру, расход охлаждающего воздуха изменением частоты вращения мотор-вентиляторов (МВ) (16²/₃ и 50 Гц или 25 и 50 Гц). Во-вторых, трехпозиционное одноконтурное регулирование по контуру, расход охлаждающего воздуха изменением частоты вращения МВ (0; 16%; 50 Гц или 0; 25; 50 Гц). Двухпозиционное двухконтурное регулирование происходит по контуру изменения расхода охлаждающего воздуха, регулирования частоты вращения МВ и по контуру уменьшения значения тока нагрузки силового блока за счет изменения напряжения управления БУВИП. Элементы системы контроля и регулирования температуры оборудования электровоза ВЛ85 приведены на рис. 4.

С датчика температуры позистора Д1 (контроль температуры коллектора t_k осуществляется по температуре компенсационной обмотки) сигналы о температуре коллектора непрерывно поступают на измерительное устройство ИУ1. При снижении температуры t_k до 70 °С ИУ1 подает сигнал на включение контактора КМ121 преобразователя частоты ПЧ типа ПЧ25/50 и отключение контакторов КМ11 и КМ14 и мотор-вентиляторов МВ (прекращается их питание напряжением с частотой 50 Гц от трансформатора Т). После выдержки времени в 4—5—6 с включаются контакторы КМ111 и КМ114, подавая на мотор-вентилятор МВ напряжение с частотой 25 Гц. При повышении температуры коллектора до 80 °С по сигналу датчика Д2 измерительное устройство ИУ2 отключает

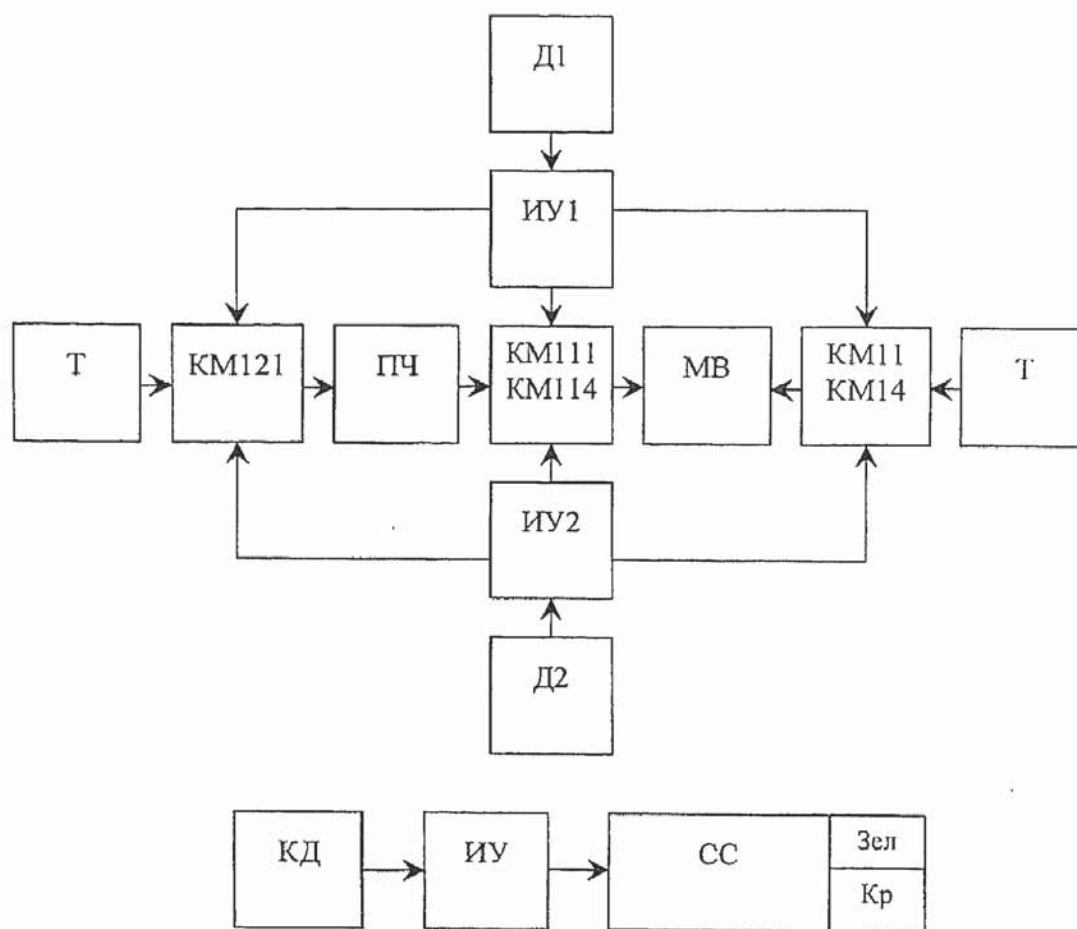


Рис. 4. Функциональная схема системы контроля и регулирования температуры оборудования электровоза ВЛ85

контактор КМ121 питания преобразователя частоты, контакторы КМ111 и КМ114 и включает контакторы КМ11 и КМ14, подавая тем самым на мотор-вентиляторы МВ напряжение с частотой 50 Гц. Контроль температуры ВИП, СР и ТЭД электровоза как в штатном режиме, так и в режиме регулирования температуры ТЭД осуществляет система, включающая комплекс датчиков КД, измерительные устройства ИУ и схему световой сигнализации СС.

Таким образом, предлагаемые функциональные схемы системы контроля и регулирования температуры оборудования электровозов, устройства для автоматического регулирования температуры обмоток ТЭД, СР обеспечивают поддержание в заданных пределах предельно допустимых значений температуры ее обмоток, независимо от условий и режимов работы силового блока в процессе эксплуатации, позволяют защитить ее от перегрева обмоток, обеспечить качественные устойчивые процессы регулирования температуры, повысить долговечность ТЭД, СР, ВИП, АВЭМ при минимальных затратах электроэнергии на функционирование систем охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Бахвалов, А. А. Зарифьян, В. Н. Кашников и др. / Под ред. Е. М. Плохова. — М.: Транспорт, 2001. — 386 с.
2. Электрификация железных дорог России (1929—1999) / Под ред. П. И. Шпакина. — М.: Интекст, 1999. — 280 с.