

На правах рукописи



ХУДОРОЖКО Максим Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА
С МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ
ОПЕРАТИВНОГО УТОЧНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОЕЗДА**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва 2009

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»).

Научный руководитель: кандидат технических наук
Никифорова Нина Борисовна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Космодамианский Андрей Сергеевич
кандидат технических наук
Рахманинов Виктор Иванович

Ведущее предприятие: Петербургский государственный университет путей
сообщения (ПГУПС)

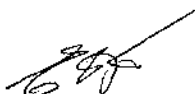
Защита диссертации состоится «30» июня 2009 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 218.002.01 при Открытом акционерном обществе «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ») по адресу: 107996, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10, зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в технической библиотеке ОАО «ВНИИЖТ».

Автореферат разослан «29» мая 2009 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять в адрес института.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук



Д.В. Ермоленко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современной тенденцией развития тягового подвижного состава (ТПС), направленной на повышение его эксплуатационных свойств, является широкое применение цифровых информационных систем. На вновь разрабатываемых и модернизируемых электровозах, таких как 2ЭС6, ВЛ11К, 2ЭС5К, 2ЭС4К и т.д., управление силовым и вспомогательным оборудованием осуществляет микропроцессорная система управления (МСУ). Поэтому, практически вся используемая МСУ информация, которая характеризует работу оборудования и управление им, представлена в цифровом виде и в существенно большем объеме, чем на электровозах предыдущего поколения.

Наличие высокопроизводительных вычислительных средств и возможность получения необходимой информации на борту электровоза позволяет решать на новом уровне задачи снижения энергозатрат и диагностирования электровозов, без увеличения количества аппаратных средств.

В настоящее время наблюдаются изменения условий разработки информационных систем, поскольку практически снято ограничение на объем используемой информации. Следовательно, решение задачи повышения эффективности информационных систем, должно основываться на новой методологии. Применяемые методы должны позволять оптимально обрабатывать большие объемы информации с учетом погрешностей модели процессов управления, контроля и неравноточности измерений, а также оценивать неизмеряемые параметры и процессы, в том числе динамические.

Знание действительных величин основного удельного сопротивления движению может позволить рационально использовать ТПС и пропускную способность железных дорог, экономно расходовать топливо и электрическую энергию для движения поездов. Все это, в свою очередь, будет способствовать повышению эффективности ТПС, улучшению качественных показателей работы железных дорог, а также снижению себестоимости перевозок.

На новых и модернизируемых локомотивах, оборудованных МСУ, часто применяется регулирование скорости вращения мотор-вентилятора. Тяговые электродвигатели (ТЭД), используемые на большинстве отечественных магистральных локомотивах, не имеют защиты от превышения (больше допустимого значения) температуры обмоток ТЭД над температурой окружающей среды, т.е. перегрева. Некорректное регулирование количества охлаждающего воздуха может еще больше усилить негативное влияние перегрева. Соответственно, весь положительный экономический эффект от экономии электроэнергии и увеличения срока службы мотор-вентилятора может быть снижен из-за увеличения затрат на устранение повреждений, вызванных перегревом.

Основным последствием перегрева является ускоренное старение изоляции, которое, с одной стороны, не мешает функционированию тягового электропривода при движении электровоза по руководящему подъему, но с другой стороны, приводит к существенному сокращению срока службы ТЭД.

Цель и задачи исследования. Целью работы является увеличение срока службы ТЭД за счет предупреждения о его перегревах и снижение затрат электроэнергии.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи.

1. Уточнение основного удельного сопротивления движению подвижного состава (ПС) в пути следования:
 - сформулирована задача оперативного уточнения основного удельного сопротивления движению ПС в пути следования;
 - разработана модель зависимости измеряемых и оцениваемых параметров;
 - сформулирована методика и создано устройство для уточнения основного удельного сопротивления движению ПС в пути следования.
2. Определение перегрева лимитирующей по нагреву обмотки ТЭД:
 - разработан и предложен алгоритм, позволяющий непрерывно рассчитывать превышение температуры лимитирующей по нагреву обмотки ТЭД при изменяющемся количестве воздуха охлаждающего ТЭД.

Методы исследования. В работе использованы алгоритмы и методы математической статистики, теории вероятностей, теории нагрева, теории фильтрации и идентификации. Для исследования основного удельного сопротивления движению ПС и перегрева лимитирующей по нагреву обмотки ТЭД применялось математическое моделирование, проводились эксперименты на электровозе 2ЭС6 при движении однопочным локомотивом и с составом. Рабочие программы разрабатывались на языке программирования Visual C++.

Научная новизна работы:

- получено новое решение задачи оперативного уточнения фактического основного удельного сопротивления движению ПС исходя из текущих условий движения;
- проведено определение перегрева лимитирующей по нагреву обмотки ТЭД в процессе поездной работы при изменяющихся режимах работы локомотива и регулирования количества воздуха, охлаждающего ТЭД.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждена строгостью теоретического обоснования, корректностью применения математического аппарата и результатами экспериментальных исследований на участке Войновка-Свердловск-сортировочный – Войновка, Свердловской железной дороги.

Практическая ценность:

- разработано и внедрено на магистральных электровозах 2ЭС6 устройство для получения фактического основного удельного сопротивления движению в пути следования;
- использование разработанного устройства позволило реализовать более эффективные алгоритмы автоматизированного ведения (автоведения) электровозов постоянного тока;
- применение разработанного алгоритма позволило определять перегрев лимитирующей по нагреву обмотки ТЭД при изменяющейся подаче охлаждающего воздуха с целью максимального использования мощности электровоза без существенного ухудшения состояния изоляции ТЭД.

Апробация работы. Основной материал диссертации представлен в научных докладах, которые обсуждались на:

- научных конференциях молодых учёных и аспирантов ВНИИЖТ в 2006, 2007, 2008 годах, г. Щербинка;
- VII международной научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века» 2006 год, г. Воронеж;
- научно-технических советах отделений ВНИИЖТ в 2005 - 2008 годах, г. Москва.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК - 2.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка использованных источников. Работа изложена на 121 странице, в том числе 103 страницы основного текста, 35 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и основные задачи исследований.

В первой главе проанализированы основные тенденции развития систем управления электровозов в России и за рубежом. Показана возможность использования МСУ для определения текущих характеристик ПС и оборудования.

Одной из характеристик, которая может быть оценена в процессе движения с использованием МСУ, является основное удельное сопротивление движению подвижного состава (рис. 1).

На величину основного сопротивления движению главным образом влияет скорость движения, при этом влияние скорости выражается всегда однозначно: с увеличением скорости величина сопротивления подвижного состава возрастает. Другим фактором, определяющим величину основного сопротивления движению, является нагрузка от оси на рельсы.



Рис. 1. Объекты и цели определения основного сопротивления движению

В явной или неявной формах это фиксируется во всех испытаниях. Характер влияния нагрузки на ось выражается так же, как и скорости движения, всегда однозначно, а именно - с увеличением нагрузки на ось основное удельное сопротивление уменьшается.

В известных формулах для выражения основного сопротивления движению используются различные параметры (скорость, нагрузка на ось, разбег колесной пары в рельсовой колее и т.д.), что свидетельствует о большой разнотипности зависимостей. Также необходимо отметить, что в разных формулах присутствует различное количество слагаемых.

Однако и наиболее сложные из имеющихся формул не отражают в явной форме всех факторов и обстоятельств, влияющих на величину основного сопротивления движению. Кроме того, практика тяговых расчетов предъявляет справедливые требования о необходимости максимального упрощения расчетных формул. В связи с этим представляется, что формулы многочленов 2-й степени типа $w = a + bv + cv^2$ являются наиболее целесообразными для выражения удельного сопротивления движению: они достаточно просты и вместе с тем включают в явной форме скорость движения v как один из главнейших факторов, влияющий на величину сопротивления, а остальные факторы отражены косвенно в коэффициентах a , b , c .

Так как величины основного удельного сопротивления различаются в зависимости от типа подвижного состава, то во всех странах существует разделение на сопротивления: вагонов и локомотивов, грузовых и пассажирских вагонов, двухосных и четырехосных вагонов и т. д. Это разделение обусловлено и оправдано главнейшими размерами и характеристиками определяющих узлов и деталей ПС, а также условиями эксплуатации. Так как условия эксплуатации, а также количество и типы вагонов точно неизвестны, в целях экономии электроэнергии определять основное сопротивление движению по заранее известной формуле не представляется целесообразным.

Знание сопротивления движению также требуется для решения задачи расчёта необходимого количества тормозных башмаков и схемы закрепления колёсных пар при вынужденной остановке поезда. Чрезвычайное происшествие, произошедшее на ДВЖД в сентябре 2006 года на перегоне Икорец – Битюг Юго-Восточной магистрали, еще раз показало актуальность решения этой задачи. Тогда остановившийся, но незакреплённый поезд пришёл в движение и столкнулся с другим, следовавшим за ним.

При вынужденной остановке поезда на перегоне машинист сам определяет, какое количество тормозных башмаков нужно для закрепления вагонов. При этом он использует данные из натурального листа о весе и длине поезда, а также информацию о профиле участка пути из режимной карты.

Однако существует большой риск ошибки в расчёте из-за человеческого фактора. При этом необходимо своевременно выявить причину неисправности локомотива. Всё это, задерживает действия локомотивной бригады по закреплению состава, а гарантированное время, когда поезд удерживается на месте на автотормозах, – 20 минут.

Учитывая то, что современная бортовая МСУ позволяет производить точную регистрацию времени, скорости, координаты местонахождения ПС, задача оценки основного удельного сопротивления движению ПС в пути следования сформулирована следующим образом.

Требуется получить оценку вектора $\hat{x} = [a \ b \ c]$ коэффициентов уравнения основного удельного сопротивления движению с минимальной дисперсией, т. е.

$$M[(x - \hat{x})^T(x - \hat{x})] = \min ,$$

где $x = [a \ b \ c]$ – вектор истинных значений оцениваемых параметров, а \hat{x} – оценка вектора x , T – обозначает транспонирование.

Показано, что решение задачи требуется, в частности, для повышения эффективности эксплуатации ПС путем снижения энергозатрат, и что эта задача до настоящего времени в локомотивном хозяйстве не решалась.

Другой актуальной задачей, которая может непрерывно решаться на борту локомотива, является определение перегрева лимитирующей по нагреву обмотки ТЭД.

На сегодняшний день при эксплуатации локомотивов главным лимитирующим фактором использования максимальной мощности является ограничение по сцеплению и проблема перегрева не является основной. Тем не менее, существует, по крайней мере, две группы локомотивов, для которых лимитирующим фактором может являться ограничение по нагреву тяговых электродвигателей. Первая группа это подталкивающие электровозы, эксплуатируемые на крутых и протяженных подъемах, а вторая – локомотивы, на которых применяется регулирование количества воздуха, охлаждающего ТЭД.

Имеющиеся данные о работе электровозов из первой группы за последние годы (в частности, на Восточно-Сибирской железной дороге) отражают, что существенная часть отказов приходится на ТЭД. Так, более половины повреждений ТЭД подталкивающих электровозов приходится на изоляционные конструкции, т.е. они вызваны нарушениями теплового режима и неблагоприятными климатическими условиями.

Базовая концепция регулирования производительности МВ, осуществляющих принудительное воздушное охлаждение ТЭД на электровозах, обоснована классиками электрической тяги профессорами О. А. Некрасовым и Б.Н. Тихменевым. Под их практическим руководством были реализованы первые практические

системы регулирования производительности МВ для электровозов переменного тока. Позднее были проработаны и другие принципы регулирования МВ.

Концепция экономического регулирования МВ базируется на возможности снижения интенсивности охлаждения при снижении электрической нагрузки ТЭД без каких-либо вредных последствий. Поскольку уменьшение количества охлаждающего воздуха при регулировании частоты вращения МВ приводит к изменению тепловых режимов тягового оборудования, при реализации бортового диагностирования мероприятия по экономии электроэнергии следует проводить, контролируя тепловое состояние лимитирующих по нагреванию обмоток ТЭД локомотива.

Вторая глава посвящена разработке методики уточнения основного удельного сопротивления движению ПС при фактических условиях движения.

Методы опытного определения сопротивления движению достаточно хорошо были отработаны ещё в XX веке, в том числе сотрудниками ВНИИЖТа Астаховым П.Н., Гурским П.А. и др., при этом искомые зависимости выражали в графической и аналитических формах, используемых в Правилах тяговых расчетов (ПТР).

До настоящего времени применяются два классических метода опытного определения сопротивления движению: динамометрический метод и метод скапывания. Для определения фактического сопротивления в процессе эксплуатации они требуют выбора и специальной подготовки пути, а также дополнительного оборудования ПС.

В диссертации решена задача определения фактического основного удельного сопротивления движению ПС без проведения мероприятий по установке дополнительного оборудования непосредственно в пути следования.

Известная теория идентификации предлагает различные методы решения аналогичных задач. Автор решил поставленную задачу с использованием фильтра байесовского типа, который позволяет использовать априорную информацию и

имеет рекуррентное исполнение. Кроме того он эффективно реализуется на бортовых вычислителях, входящих в состав МСУ локомотивов.

ПС представлен как некоторая система, состояние которой в любой момент времени однозначно характеризуется определенным набором величин, как правило, недоступных для непосредственного определения. В терминах векторной алгебры эти величины являются элементами вектора состояния системы, отнесенного к заданному моменту времени k

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + q_k,$$

где x_k – вектор переменных состояния размера $(n \times I)$, Φ_k – матрица перехода размера $(n \times n)$, q_k – «белый шум», обладающий свойством некоррелированности двух соседних значений размера $(n \times I)$.

Дополнительно имеются переменные, некоторым образом связанные с состоянием системы, которые можно измерить с заданной точностью. Такие величины составляют вектор наблюдений (измерений) y_k размера $(m \times I)$, относящихся к определенному моменту времени k

$$y_k = H_k x_k + r_k,$$

где H_k – матрица измерений размера $(m \times n)$, r_k – вектор ошибок измерений $(m \times I)$.

Алгоритм дискретного линейного фильтра реализован в два этапа.

Первый этап это коррекция априорной оценки

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}), \quad (1)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1}, \quad (2)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}, \quad (3)$$

где I – единичная матрица; K_k – матрица усиления; R – неотрицательно определенная матрица ошибок; $P_{k|k-1}$ – ковариационная матрица оцениваемых параметров, рассчитанная на шаге $k-1$; k – текущий момент времени.

На втором этапе производится экстраполяция оценок \hat{x}_k и P_k на момент времени $k+1$

$$x_{k+1|k} = \Phi_k \hat{x}_{k|k},$$

$$P_{k+1|k} = \Phi_k P_{k|k} \Phi_k^T + Q,$$

где Q – неотрицательно определенная матрица ошибок.

Для реализации рекуррентной процедуры фильтрации задаются начальный априорный вектор состояния \hat{x}_0 и ковариационная матрица оцениваемых параметров P_0 .

Фактические коэффициенты основного удельного сопротивления движению ПС ищутся по выше изложенному общему алгоритму из многократных текущих измерений скорости движения в режиме выбега в виде

$$w_{ox} = a + bv_k + cv_k^2, \quad (4)$$

где w_{ox} – основное удельное сопротивление движению ПС на выбеге, v – скорость движения.

Сначала определяется зависимость состояния системы с измерениями, а также с их статистическими характеристиками. В данном случае имеет место вектор, характеризующий неизменное состояние системы (фундаментальная матрица $\Phi = I$), состоящий из неизвестных коэффициентов сопротивления движению. Тогда уравнение, описывающее текущее состояние системы, записывается как $x_{k+1} = x_k$.

Начальное значение каждого коэффициента берется из ПТР. Фактические же значения коэффициентов a , b и c отличаются от априорно заданных.

При движении локомотива в режиме выбег значение величины ускорения получено по известному уравнению движения

$$(1 + \gamma)m \cdot dv/dt = \varepsilon(F - W - B), \quad (5)$$

где F – сила тяги; B – сила торможения; W – общее (основное плюс дополнительное) сопротивление движению; t – текущее время, сек.; γ – коэффициент инерции вращающихся частей; ε – переводной коэффициент, т.к. произвольно могут быть выбраны единицы измерений только для трех из четырех входящих в уравнение величин.

Так как уточнение коэффициентов происходит только на выбеге, то сила тяги $F = 0$ и сила торможения $B = 0$, и уравнение (5) в относительных единицах переписывается в виде

$$\frac{dv}{dt} = -(w_{ox} + w_r + w_l) \cdot \frac{\varepsilon}{1+\gamma},$$

где w_l - сопротивление движению от уклонов; w_r - сопротивление движению от кривых.

В виде конечных разностей для текущего момента времени k

$$\frac{v_k - v_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} = \frac{-(w_{ox} + w_r + w_l) \cdot \varepsilon}{(1+\gamma)}.$$

В итоге получено уравнение наблюдения для расчетной модели

$$v_k = v_{k-1} - ((a + bv_k + cv_k^2) + w_r + w_l) \frac{\varepsilon}{(1+\gamma)} \cdot (t_k - t_{k-1}). \quad (6)$$

В общем случае это уравнение (6) нелинейное. Зависимости результатов измерений от оцениваемых параметров являются достаточно гладкими и линеаризованное уравнение получено из уравнения наблюдения (6) нахождением первых производных по каждому оцениваемому параметру (коэффициенту) $h1 = \frac{\partial v_k}{\partial a}$,

$$h2 = \frac{\partial v_k}{\partial b}, h3 = \frac{\partial v_k}{\partial c}, \text{ в виде}$$

$$\hat{v}_{k+1|k} = v_k + (H_k \hat{x} - (w_k \cdot \varepsilon / (1 + \gamma))),$$

где $H_k = [h1 \quad h2 \quad h3]$; вектор $\hat{x} = [a \quad b \quad c]^T$; $\hat{v}_{k+1|k}$ - оценка скорости движения для следующего шага; v_k - измеренное значение скорости движения на текущем шаге; w_k - дополнительное удельное сопротивление движению от приведенного уклона.

Это уравнение использовано для определения коэффициентов a , b , c основного удельного сопротивления движению, входящих в формулу (4).

Таким образом, на основе известной оценки \hat{x}_k в текущий момент времени k дается прогноз оценки для будущего момента $k + 1$ (априорная оценка $\hat{x}_{k+1|k}$), который в дальнейшем корректируется с учетом текущих измерений скорости по формулам (1 - 3).

Методика определения основного удельного сопротивления движению ПС графически представлена на рис. 2. Применение данной методики помогает перейти от обобщенно-усредненной модели расчета сопротивления движению в за-

зависимости от типа подвижного состава к конкретной модели, а также более точно определять значения сопротивления движению.

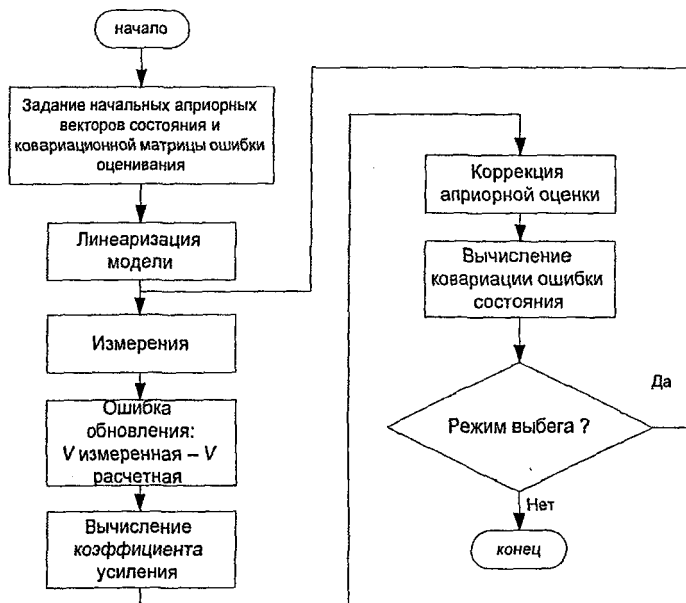


Рис. 2. Общий вид методики определения основного удельного сопротивления движению

Третья глава посвящена разработке алгоритма определения текущего перегрева лимитирующей по нагреву обмотки ТЭД.

Наиболее нагруженным элементом ТЭД и всей цепи тягового электропривода является якорная обмотка и в целом якорь ТЭД, но поместить датчик температуры на якоре и передать информацию в диагностическую систему достаточно сложно и вряд ли целесообразно.

Методы непосредственного измерения позволяют получить информацию о температуре с наименьшим количеством преобразований, однако предполагают сложные технические решения. Существующие экспериментальные методы определения нагрева вращающихся обмоток электрических машин постоянного тока достаточно сложны и мало удобны для использования в системе бортового диаг-

ностирования локомотива.

В одной из современных работ, посвященных вопросу контролирования нагрева ТЭД, нагрев контролируется температурным датчиком, регистрирующим нагрев компенсационной обмотки. Следует отметить, что у компенсационной и якорной обмотки существенно отличаются условия их охлаждения (теплоотвода). К минусам предложенного подхода следует отнести то, что требуются определенные капиталовложения на установку и периодическое обслуживание аппаратных средств, необходимых для контроля нагрева ТЭД.

Наличие на борту локомотивов МСУ позволяет расчетным способом осуществлять непрерывный контроль температуры якорных обмоток ТЭД локомотива в пути следования, используя информацию со штатных датчиков МСУ. Совместное использование расчетных и методов непосредственного контроля температуры обмоток ТЭД представляется наиболее продуктивным, позволяющим уменьшить недостатки, присущие каждому методу в отдельности.

Автором предложено осуществлять тепловой контроль не какого-либо конкретного ТЭД, а некоторого обобщенного, характеристики которого были бы получены по результатам статистических испытаний большого количества двигателей, т.е. осуществлять контроль перегрева «идеального» ТЭД.

Для каждого типа ТЭД имеются полученные экспериментальным путем на стенде сетки кривых нагревания и охлаждения при разных нагрузках, при разных степенях охлаждения и для всех обмоток ТЭД. Это позволяет определять температуру нагрева якоря или другой обмотки ТЭД в любой момент времени, в зависимости от продолжительности работы, величины тока нагрузки и количества охлаждающего воздуха.

Превышение температуры обмотки ТЭД над температурой окружающей среды определяется по известному уравнению

$$\tau = \tau_{\infty} \cdot (1 - e^{-dt/T}) + \tau_0 \cdot e^{-dt/T}, \quad (7)$$

где τ_{∞} - установившееся превышение температуры обмотки тягового двигателя над температурой окружающей среды при данном режиме его работы; τ_0 - на-

чальное превышение температуры обмотки; t – время между замерами; $T = C/B$ – постоянная времени нагрева, равная отношению теплоёмкости двигателя (C) к его теплоотдаче (B).

В общем виде алгоритм определения перегрева якорной обмотки ТЭД по уравнению (7) представлен на рис. 3.

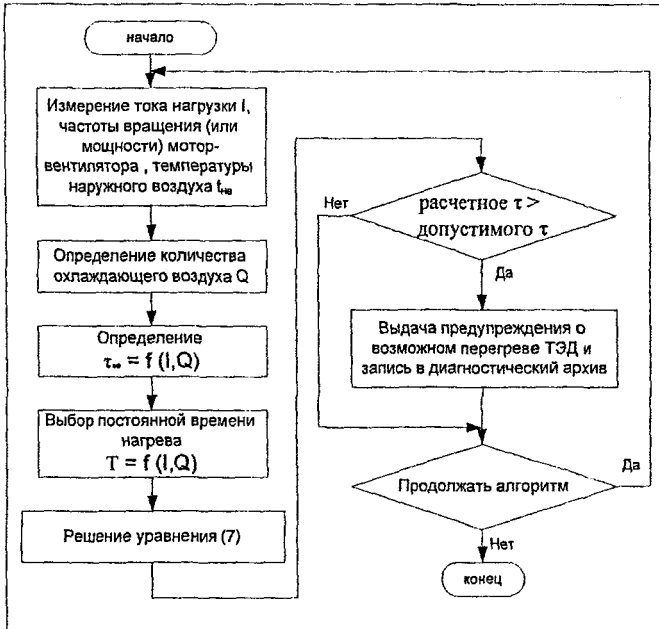


Рис. 3. Общий вид алгоритма определения перегрева якорной обмотки ТЭД

Уравнение (7) решается в соответствии с алгоритмом (рис. 3) непосредственно на борту локомотива, используя величины тока нагрузки – I , количества охлаждающего воздуха – Q , измеренные и вычисленные в процессе движения бортовой МСУ.

Установлено, что характер изменения постоянной времени нагрева T напрямую зависит от темпа нарастания температуры обмотки ТЭД, поэтому автор руководствовался принципом, что следует выбирать такую величину T , которая обеспечивает наибольшую сходимость теоретически построенной по ней кривой $\tau = f(t)$ с опытной. При этом стремясь к тому, чтобы максимальное совпадение

расчетной кривой с опытной было на участке кривой нагревания, близком к предельным температурам, допускаемым нормами. Фактором, ограничивающим использование ТЭД, является максимальный нагрев, поэтому именно эти наибольшие превышения температуры должны определяться наиболее точно.

Чтобы использовать вышеприведенную формулу (7) необходимо определить τ_{∞} при любом токе нагрузки локомотива. Расчет установившегося перегрева обмотки ТЭД τ_{∞} предлагается определять, основываясь на сетках кривых нагревания и охлаждения обмоток, полученных при испытаниях. Для значений токов, присутствующих в сетках, определяется установившаяся температура перегрева обмотки ТЭД. Аппроксимируя и экстраполируя полученные данные одним из известных методов, определяется функциональная связь $\tau_{\infty}(I, Q)$ между током и установившейся температурой обмоток τ_{∞} при заданном количестве воздуха Q . Таким образом, значения τ_{∞} отсутствующие в сетках кривых нагревания получаются теоретически, методом подбора, обеспечивая, однако, вполне достаточную точность при расчете перегрева $\tau = f(t)$.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию предложенной методики и алгоритма.

Сопrotивление движению ПС определялось при движении с грузовыми поездами на Свердловской ж. д. Результаты эксперимента, проведенного 13.07.2008 г. в поездке с поездом массой 3700 тонн (296 осей), приведены далее.

В процессе движения один раз в секунду производилась запись данных о скорости (км/ч), координате (метрах) и вычислялось значение спрямленного уклона под поездом. Для регистрации измерений использовалась бортовая аппаратура микропроцессорной системы управления и диагностирования с точностью измерения скорости $\Delta V = 0,5$ км/ч и координаты 50 метров.

В соответствии с формулой (9) при $q_0 = 12,5$ т, $m_{лок} = 200$ т, $\sum_1^N m_{\sigma j} = 3700$ т получается $w_{ox} = 1.015 + 0.008154v + 0.0002077v^2$. Соответственно априорные значения элементов вектора состояния: $a_0 = 1.015$; $b_0 = 0.008154$, ч/км; $c_0 = 0.0002077$, ч²/км².

В результате обработки зарегистрированных в процессе движения поезда (участок с 1881.5 км – по 1892.6 км) на выбеге данных получены коэффициенты:

$$a = 0.79335; b = 0.0014258, \text{ ч/км}; c = 0.000157, \text{ ч}^2/\text{км}^2.$$

Дисперсия коэффициента a , $D(a) = 0.047185$; коэффициента b , $D(b) = 4.7177 \cdot 10^{-5}$; коэффициента c , $D(c) = 1.4911 \cdot 10^{-8}$; и соответственно уравнение основного удельного сопротивления движению поезда

$$w_{ax} = 0.79335 + 0.0014258 v + 0.000157 v^2, \quad [\text{Н/кН}] \quad (8)$$

где v – скорость, км/ч.

Процесс уточнения коэффициентов и их дисперсий представлен на рис. 4.

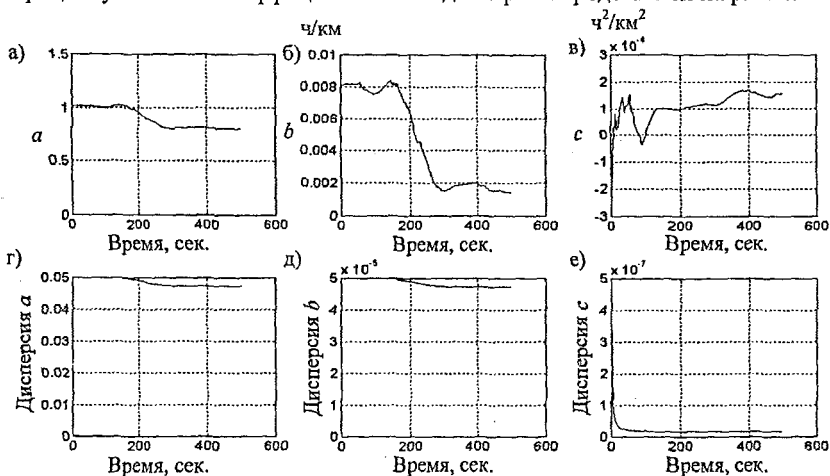


Рис. 4. Процесс уточнения значений априорных коэффициентов основного удельного сопротивления: а) коэффициента a , б) коэффициента b , в) коэффициента c , г) дисперсия коэффициента a , д) дисперсия коэффициента b , е) дисперсия коэффициента c

Для проверки адекватности полученной аналитической зависимости (8), было проведено моделирование, начиная с различных скоростей для нескольких участков движения на выбеге. Моделирование проводилось по уравнению (6). График представлен на рис. 5. На этом же рисунке построены кривая фактически измеренной скорости поезда и кривая, полученная аналогичным моделированием с использованием формулы из ПТР

$$w_{ПТР} = (w_{лок} * m_{лок} + \sum_1^N w_j * m_{ej}) / m, \quad (9)$$

где $w_{лок}$ – основное удельное сопротивление движению локомотива, Н/кН; w_j – основное удельное сопротивление движению вагонов j -го типа, Н/кН; m_{ej} – масса вагонов j -го типа, т; $m = m_{лок} + \sum_1^N m_{ej}$ – масса поезда, т; $m_{лок}$ – масса локомотива, т; N – число типов вагонов в составе.

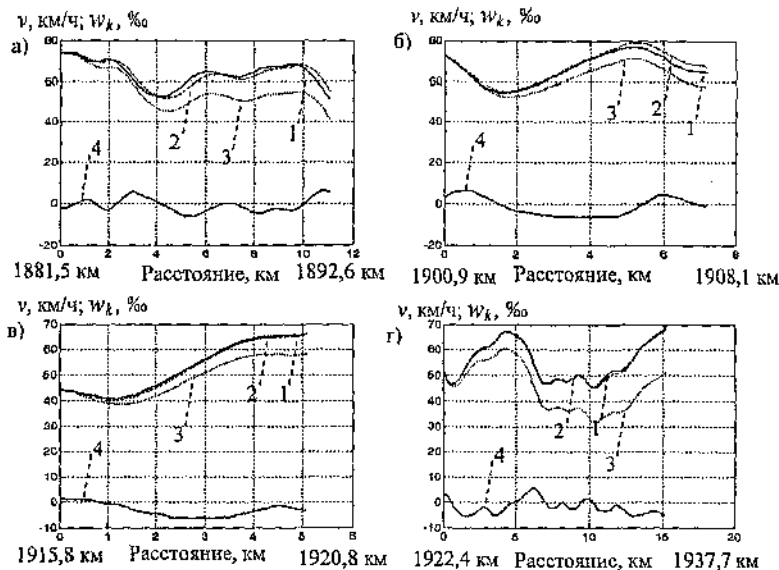


Рис. 5. Скорости поезда для 4-х различных участков: 1 – измеренная; 2 – полученная моделированием по уточненным коэффициентам; 3 – полученная моделированием по коэффициентам и формуле из ПТР; 4 – значение дополнительного удельного сопротивления от приведенного уклона (w_k)

На рис. 6 показаны отклонения скоростей, прогнозируемых по модели от измеренной скорости. Среднеквадратичные отклонения (СКО) для соответствующих участков составили (в км/ч):

- между измеренной скоростью и прогнозируемой по модели с использованием коэффициентов, полученных в результате применения методики для участка а) СКО = 2.0015, для участка б) СКО = 1.0797, для участка в) СКО = 0.22657, для участка г) СКО = 0.50269;

- между измеренной скоростью и прогнозируемой по модели с использованием коэффициентов из ПТР для участка а) СКО = 4.3754, для участка б) СКО = 2.2397, для участка в) СКО = 2.1858, для участка г) СКО = 5.2619.

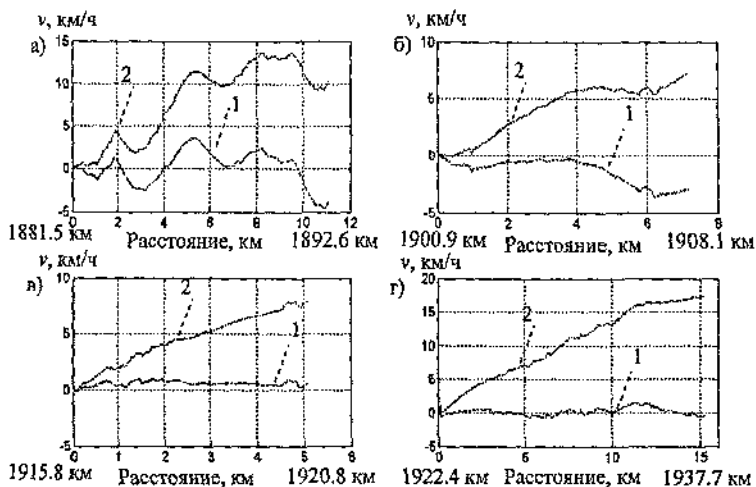


Рис. 6. Зависимость отклонений между измеренной скоростью и скоростями, прогнозируемыми по модели от расстояния для 4-х участков: 1 – по уточненным коэффициентам; 2 – по коэффициентам и формуле из ПТР

Таким образом, сделан вывод, что фактическое основное удельное сопротивление движению поезда определено с достаточной достоверностью и значительно точнее сопротивления, получаемого при использовании коэффициентов из ПТР.

Эксперименты по определению перегрева якорной обмотки ТЭД проведены на электровозе 2ЭС6-002 на участке Войновка - Свердловск-Сорт, масса состава грузовых вагонов – 7992 т, и масса локомотива – 200 т.

Тепловые испытания проведены с целью опытного установления зависимости температуры элементов ТЭД от эксплуатационного режима движения электровоза и определения ее соответствия нормированным величинам.

Были сделаны предварительные замеры расхода охлаждающего воздуха, поступающего на охлаждение всех восьми ТЭД. По результатам этих замеров двигатель №2 с наименьшим расходом охлаждающего воздуха (не ниже номи-

нального) был оборудован для проведения дальнейших тепловых испытаний. В испытаниях контролировались температуры якоря и обмотки возбуждения ТЭД, а также окружающего воздуха.

На рис. 7 и рис. 8 показаны расчетные и опытные кривые изменения температуры ТЭД № 2 электровоза №002 в поездке в нечетном направлении по маршруту Войновка – Свердловск-Сортировочный.

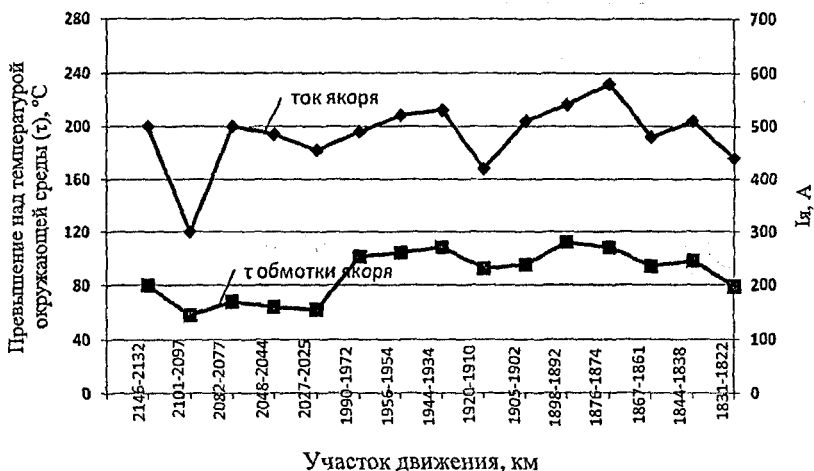


Рис. 7. Кривые изменения температуры тягового электродвигателя электровоза 2ЭС6-002 на участке Войновка - Свердловск-Сортировочный

Измерения проводили в конце оговоренных программой испытаний подъемов при полной остановке электровоза. При этом для уменьшения остывания ТЭД с пульта машиниста отключались мотор-вентиляторы. Сопротивление нагретых элементов ТЭД определяли методом амперметра-вольтметра. Значения греющего тока определяли путем фиксации диаграмм токов якоря и обмотки возбуждения ТЭД в функции времени на измерительно-вычислительном комплексе.

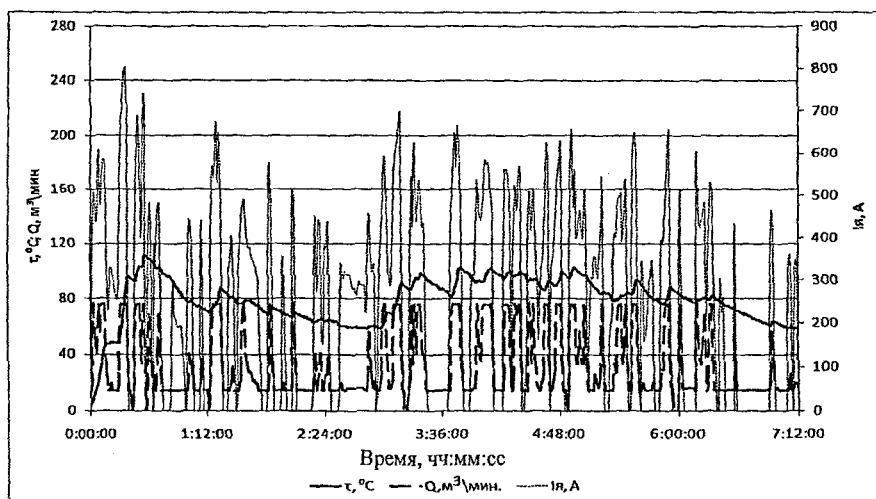


Рис. 8. Расчетная кривая определения превышения температуры тягового электродвигателя электровоза 2ЭС6-002 на участке Войновка - Свердловск-сортировочный

Как видно из рисунков, превышение температуры обмоток тяговых двигателей над температурой окружающей среды в данной поездке не превышало допустимой величины $160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Анализ результатов показал, что максимальные отклонения расчетных значений перегрева от опытных лежат в пределах $\pm 10\%$.

Основные результаты и выводы по работе

1. В современных условиях применение бортовых микропроцессорных систем управления позволяет решать задачи повышения эффективности эксплуатации тягового подвижного состава путем непрерывного отслеживания в пути следования характеристик подвижного состава и обработки значительных объемов информации с учетом ошибок и неравноточности измерений, а также оценки косвенных параметров.
2. В работе сформулированы и решены задачи:
 - получения достоверной оценки основного удельного сопротивления движению в пути следования;

- непрерывного определения перегрева лимитирующей по нагреву обмотки ТЭД при изменяющемся количестве воздуха подаваемого на охлаждение.
3. Для получения достоверной оценки основного удельного сопротивления движению подвижного состава предложено использовать фильтр байесовского типа, позволяющий получать основное удельное сопротивление движению с минимальной дисперсией. Разработана методика для уточнения основного удельного сопротивления движению подвижного состава (как одиночного локомотива, так и поезда в целом) во всем диапазоне скоростей при фактических условиях движения непосредственно во время поездки.
 4. На основании предложенной автором методики разработано и реализовано устройство на базе существующей микропроцессорной системы управления электровоза 2ЭС6, осуществляющее определение основного удельного сопротивления движению подвижного состава. Устройство используется при оценке характеристик подвижного состава, в частности, для автоведения.
 5. Предложен алгоритм, позволяющий рассчитывать превышение температуры лимитирующей по нагреву обмотки ТЭД при изменяющемся количестве охлаждающего воздуха и определять перегрев исправных двигателей при нарушениях в режимах вождения поездов и вождении поездов повышенного веса.
 6. Предложенный алгоритм реализован в системе диагностирования электровоза 2ЭС6 и находится в эксплуатации.
 7. Адекватность моделей и достоверность получаемых результатов подтверждены на электровозах 2ЭС6.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Худорожко М.В. Непрерывный контроль температуры якорных обмоток тяговых электродвигателей локомотива // Вестник ВНИИЖТ. 2009 г. №1. С. 27-29.
2. Худорожко М.В. Метод оценки переменных с минимальной дисперсией /И.А. Елисеев, Л.М. Жебрак // Мир транспорта. 2009 г. №1. С. 28 - 32.

Публикации в других изданиях:

3. Худорожко М.В. Подсистема диагностирования в составе единой комплексной системы локомотивных устройств безопасности /М.С. Хазов //Сборник статей учёных и аспирантов «Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформирования». М.:Интекст, 2006 г. С. 99-106.
4. Худорожко М.В. Анализ функциональной безопасности системы управления электровозом /Н.Б. Никифорова, О.В. Рогожникова //Труды VII Научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века». Воронеж. 2006 г. т.1. С. 120-125.
5. Худорожко М.В. Улучшение эксплуатационных характеристик электровозов прогнозированием технического состояния их оборудования /М.С. Хазов //Сборник статей учёных и аспирантов «Развитие железнодорожного транспорта в условиях рыночной экономики». М.:Интекст. 2007 г. С. 76-80.
6. Худорожко М.В. Использование методов оптимальной фильтрации для обработки информации бортовых микропроцессорных систем электровоза /М.С. Хазов //Сборник статей учёных и аспирантов «Железнодорожный транспорт на современном этапе. Задачи и пути их решения». М.:Интекст. 2008 г. С. 25-31.

Подписано к печати 27.05.2009 г.
Формат бумаги 60х90 1/16 Объем 1,5 п.л.
Заказ 83 Тираж 100 экз.
Типография ОАО «ВНИИЖТ», 3-я Мытищинская ул., д.10