

монтов, электрическое (25 %) и вспомогательное (10 %) оборудование. Анализ динамики отказов на протяжении длительного периода эксплуатации тепловозов показал, что, несмотря на предпринимаемые меры по совершенствованию системы технического обслуживания и ремонта (СТОР) и внедрению средств и методов технического диагностирования тепловозный дизель остается самым ненадежным узлом. В значительной степени это объясняется отсутствием в локомотивных депо эффективных методов оперативного безразборного контроля технического состояния деталей дизеля, которые в процессе эксплуатации подвергаются значительным динамическим нагрузкам.

Дальнейшее совершенствование СТОР тепловозов неразрывно связано с развитием и совершенствованием системы их технического диагностирования. В настоящее время на железнодорожном транспорте используется более двухсот видов средств диагностирования, причем многие из них дублируют друг друга.

Таким образом, при организации системы технического диагностирования парка тепловозов необходимо в первую очередь оценить технические возможности предлагаемых диагностических средств и систем с целью формирования их рационального набора. Выполненный анализ надежности работы узлов и систем тепловозов и обеспеченности процесса их диагностирования показал, что формирование комплекса диагностических средств характеризуется бессистемностью, поскольку осуществляется без научной проработки этого важного вопроса. Именно поэтому в локомотивных депо сформирован случайный набор диагностических средств, разработанных разными фирмами. Практика показывает, что в числе однотипных диагностических средств только одно обладает оптимальным сочетанием технико-экономических параметров.

Список литературы

1 Калиева, С. Т. Техническая безразборная диагностика локомотивов как современный метод технического диагностирования / С. Т. Калиева, В. Н. Панченко // Наука и образование транспорту. – 2016. – № 1. – С. 36–37.

2 Анализ современных методов технической диагностики, применяемых для контроля топливной аппаратуры дизеля локомотива / С. Т. Калиева, В. Н. Панченко // Известия Транссиба. – 2018. – № 1 (33). – С. 30–38.

3 Калиева, С. Т. Анализ диагностических комплексов при техническом обслуживании тепловозов на куйбышевской железной дороге / С. Т. Калиева, В. Н. Панченко, В. В. Иванов // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – № 3 (69). – С. 7–13.

4 Применение безразборной диагностики в эксплуатации и ремонте локомотивов / С. Т. Калиева [и др.] // Наука и образование транспорту. – 2019. – № 1. – С. 30–32.

5 Калиева, С. Т. Повышение топливной экономичности ДВС за счет ограничения воздействия эксплуатационных факторов / С. Т. Калиева, Л. Л. Саидова, В. Н. Панченко / Проблемы безопасности транспорта в современных условиях развития общества : материалы междунар. студ. науч.-практ. конф. – Нижний Новгород, 2020. – С. 54–58.

УДК 625.8

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ТОКОПРИЕМНИКА И КОНТАКТНОГО ПРОВОДА С УЧЕТОМ МЕХАНИЧЕСКИХ, ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ

И. И. КАПЛЮК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время на железной дороге с целью обеспечения бесперебойного движения поездов в электрическом сообщении остается актуальным вопрос повышения износостойкости непосредственно контактной сети, ее элементов, а также элементов, предназначенных для съема электрического тока, устанавливаемых на электропоездах (таких как токоприемники и контактные вставки). Более детальное исследование взаимодействия токоприемника с контактным проводом электросети имеет в качестве долгосрочной цели выработку рекомендаций для безопасного выполнения транспортных услуг и повышения эффективности использования транспортной инфраструктуры для полного удовлетворения потребностей экономики государства и населения. В связи с этим происходит постоянный поиск новых конструктивных решений как токосъемной части электропоезда, так и контактной сети. Однако для обоснованного выбора конструктивного исполнения следует наиболее полно учитывать условия и причины плохого токосъема, которые до сих пор изучаются многими учеными.

Изнашивание элементов скользящего контакта является сложным электромеханическим процессом. Для удобства изучения этот процесс обычно разделяют на электрический и механический, хотя такое

деление весьма условно, так как электрические и механические явления в контакте взаимозависимы. Так, при дуговом токосъеме, например во время гололеда, сильно ухудшается состояние поверхности трения; но это приводит к усилению механического изнашивания. В то же время при грубых механических повреждениях этой поверхности становится более интенсивным и электрическое изнашивание.

Процесс токосъема сопровождается рядом факторов: нарушением непрерывного обеспечения оптимальной силы прижатия, постоянным изменением контактной площадки, трением, нагревом от трения и нагревом от передачи тока, плавлением, испарением и переносом материала, различного рода изнашиваниями, вызванных электрической эрозией и механическими повреждениями и т. д. На интенсивность изнашивания устройств токосъемной контактной пары влияют режимы движения поездов, скорость движения, тип тока, материал, конструкция, форма контактирующих элементов, условия окружающей среды и др.

Качественное моделирование систем различных физических явлений на сегодняшний день позволяют выполнить CAE-системы инженерного анализа (ABAQUS, ANSYS, COSMOS, I-DEAS, NASTRAN и др.). В данной работе поставлена задача по разработке и анализу конечноэлементных моделей контактирующих элементов токосъемной пары «провод – токосъемная вставка» в среде пакета инженерного анализа ANSYS. Данное программное обеспечение позволяет рассматривать конкретную комбинацию факторов, задаваемых инженером, получая распределения напряжений, температур, скоростей, электромагнитных полей и т. д.

В качестве входных данных поэтапно задавались механические, тепловые и электрические свойства контактируемых материалов провода и вставки. При последовательной разработке моделей задавались определенные геометрические размеры и упрощенные формы контактного провода без износа и с некоторым равномерным износом (в случае рассмотрения протекания тока в проводе), а также токосъемной вставки пантографа. Используемый на практике провод имеет сложную форму поперечного сечения, связанную с особенностями его крепления. Однако в зоне контакта с угольной вставкой поверхность провода цилиндрическая. Поэтому с целью упрощения модели предполагалось, что контактный провод имеет круглое сечение. Длина участка провода принята равной 20 см, его радиус сечения – 65 мм. Модель токосъемной вставки представляла собой прямоугольный параллелепипед с размерами $10 \times 0,7 \times 3$ см.

Физические характеристики элементов модели приняты следующими: провод из меди с модулем Юнга, равным 100 ГПа, и коэффициентом Пуассона 0,2; угольная вставка с модулем Юнга 10 ГПа, коэффициентом Пуассона – 0,24. Плотности материалов провода и вставки 5529 и 1760 кг/м³ соответственно. Коэффициент трения в контакте принят равным 0,06, коэффициент теплопередачи 70 Вт/(м²·К). Электрическое удельное сопротивление материала провода $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, материала вставки 0,008 Ом·м. Тестирование модели показало, что результаты конечноэлементного моделирования достаточно адекватно отображают распределение напряжений и температур в элементах модели.

Была задана температура поверхности угольной вставки 70 °С и начальная температура контактирующих элементов, равная температуре окружающей среды 15 °С. В модели учитывался конвективный обмен с окружающей средой (воздух). Получено распределение температур в зоне контакта при нагревании поверхности угольной вставки с учетом температуры окружающей среды в установившемся режиме. Тестирование модели показало, что результаты конечноэлементного моделирования достаточно адекватно отображают распределение температур в элементах модели.

В ходе вычислений установлено, что тепловой поток быстро распространяется по контактному проводу вследствие его высокого коэффициента теплопередачи. Градиент температуры по длине провода через 0,1 с после начала контакта составляет около 20 °С/м.

Дальнейшее исследование проводилось в среде пакета ANSYS Workbench с помощью решателя Mechanical APDL. В результате разработана конечно-элементная модель, позволяющая осуществить совместный анализ полей напряжений и температур при влиянии сухого трения в процессе скольжения токосъемной вставки электровоза вдоль провода электросети.

Для анализа выбран тип анализа Transient Structural. При этом использовались ранее принятые характеристики и свойства модели. В качестве конечного элемента выбран линейный элемент связанных полей SOLID5, позволяющий производить учет прочностных степеней свободы совместно с температурой. Сетка создавалась линейным генератором сетки с размером конечного элемента 0,4 мм. Число конечных элементов модели составило около 85 000. В данной модели в дополнение к ранее описанным параметрам учитывались следующие характеристики материалов провода и токосъемной вставки: коэффициент теплового расширения $16,7 \cdot 10^{-6}$ и $7,9 \cdot 10^{-6}$ 1/К, коэффициент теп-

лопроводности – 380 и 150 Вт/м·К, коэффициент удельной теплоемкости – 383 и 708 Дж/кг·К. Начальный коэффициент трения в контакте увеличен до 0,2.

Чтобы обеспечить реальные условия работы провода, предполагается, что один из его концов закреплен, а у второго отсутствует вертикальное смещение. Сила натяжения провода принята равной 500 Н, сила прижатия вставки к проводу – 140 Н. Считалось, что токоприемник перемещается вдоль провода со скоростью 1 м/с.

Контактная пара назначена фрикционной, несимметричной с формулировкой «Augmented Lagrange». Было определено обязательное наличие контакта между телами в начальный момент времени. Чтобы обеспечить более устойчивый процесс счета, значение коэффициента нормальной жесткости тел по всей поверхности контакта уменьшено в 10 раз до 0,01 по сравнению со значением по умолчанию. Для расчета плотности теплового потока, вызванного кулоновым трением, коэффициент рассеивания энергии принят равным 1. Весовой коэффициент распределения тепла, учитывающий особенности обмена тепла между контактной и целевой поверхностями, считался равным 0,5. Предполагалось, что при температуре 22 °С тела не имеют тепловых деформаций. Также данная температура задана в качестве начальной температуры тел.

Полученная модель позволила рассмотреть тепловыделение и его дальнейшее распределение по объему элементов при контактном взаимодействии, сопровождающемся трением. Отметим, что длительность одноразового расчета для интервала времени 0,5 с составила более 70 часов. В результате вычислений было обнаружено, что наибольший нагрев достигается в зоне контакта, а место пятна нагрева изменяется при движении вставки. Расчеты показали, что повышение температуры вставки в зоне контакта в первые 0,5 с от начала скольжения составляет около 14 градусов, что соответствует реализуемым на практике значениям. Заметное увеличение температуры провода наблюдается только вблизи области контакта. Это соответствует полученным ранее результатам теплового анализа. Данная модель позволила также произвести оценку значений напряжений, возникающих в результате скользящего контакта.

Разработанные модели в последующем могут быть использованы для усовершенствования конструкции узла токосъема.

УДК 621.892, 620.178

ЭКСПРЕСС-МЕТОД УСКОРЕННОГО ВЫБОРА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

В. В. КОМИССАРОВ, Е. С. ТАРАНОВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Разработан экспресс-метод испытания смазочных материалов при трении качения, в основу которого было положено ускоренное многоступенчатое нагружение испытываемых пар трения в широком диапазоне изменения контактных нагрузок. Отработка экспресс-метода выполнялась при испытаниях моделей зубчатого зацепления (пар трения) из стали 18ХГТ и 25ХГТ и чугуна марки ВЧГГ. Испытания проводили на машине для износоусталостных испытаний СИ-03М по [1] при использовании антифрикционных жидких и пластичных смазочных материалов, а также при сухом трении.

Для реализации программы испытаний задавали начальный уровень контактных напряжений $p_n = 1206$ МПа ($F_N = 10$ Н); степень приращения напряжений $\Delta p_i = \text{const} = 550$ МПа; продолжительность ступени нагружения $n_i = \text{const} = 10^5$ циклов. В процессе испытаний в автоматическом режиме измеряли величины сближения осей δ_c , момента трения качения M_k и вибраций dВ (определяются общим уровнем шума). По измеренному моменту трения рассчитывали коэффициент сопротивления качению f_r . В процессе испытаний на каждой ступени нагружения контролировали изменение температуры в зоне контакта образца и контрообразца. Испытания вели непрерывно до заданного числа циклов нагружения (10^6 циклов) или до достижения предельного состояния по одному из пяти параметров ($F_{N\text{lim}}$, $\delta_{c\text{lim}}$, dV_{lim} , $M_{k\text{lim}}$, T_{lim}).

Проведенные испытания сочетаний материалов сталь 18ХГТ / сталь 18ХГТ, сталь 25ХГТ / сталь 25ХГТ, чугун ВЧГГ / сталь 18ХГТ, чугун ВЧГГ / сталь 25ХГТ в среде четырех смазочных материалов и в режиме сухого трения показали, что для пар трения сталь / сталь наилучшие характери-