

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ТОННЕЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА МЕТРОПОЛИТЕНА (в режиме реального перемещения поезда)

О. Н. Будадин, д. т. н., Т. Е. Троицкий-Марков, Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО»

Н. Н. Комиссаров, М. А. Почечун, В. Я. Пахомов, Московский метрополитен

Одной из важнейших задач, стоящих в настоящее время перед службами, эксплуатирующими сложные технические системы, является сохранение и повышение надежности и безопасности их эксплуатации.

По заключению экспертов, наиболее перспективный и экономически целесообразный способ решения таких проблем заключается в периодическом оперативном инструментальном определении реального технического состояния оборудования с последующей разработкой и реализацией оптимальной технологии его восстановления и продления ресурса эксплуатации в соответствии с нормативной документацией.

Применение такого подхода актуально к критически опасным объектам метрополитена, одним из важнейших из которых является электрооборудование. Это связано с достаточно большой скоростью его износа из-за экстремальных условий эксплуатации – наличия периодических критических моментов времени (часы «пик») с наиболее тяжелыми условиями работы электрооборудования. Это также значительно повышает вероятность выхода его из строя и может спровоцировать процесс выхода всей систе-

мы; наличия реальной потенциальной опасности жизни и здоровью людей при возникновении аварийных ситуаций.

Одним из эффективных методов диагностики, наиболее пригодным для решения задач дистанционного неразрушающего контроля электрооборудования, вследствие своих эксплуатационных и технических достоинств, является тепловой метод, основанный на регистрации и анализе температурных полей контролируемых объектов в реальных условиях их эксплуатации. В связи с этим в последнее время активизировались работы в этом направлении, а в печати появился ряд публикаций, посвященных как контролю электрохозяйства метрополитена, так и общим вопросам диагностики технического состояния электрооборудования.

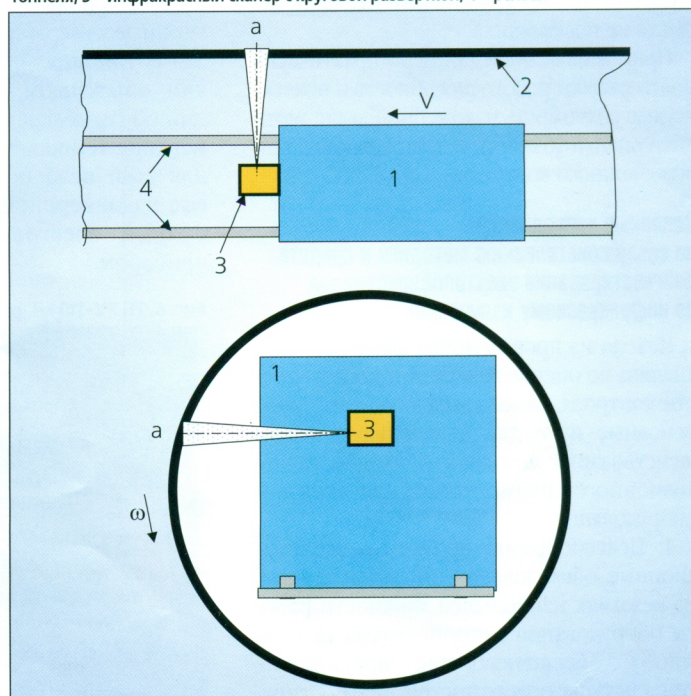
Следует отметить, что тепловой (тепловизионный) метод неразрушающего контроля (ТНК) является одним из «молодых», но наиболее интенсивно развивающихся методов неразрушающего контроля и диагностики технического состояния объектов. Благодаря современному техническому, методическому и программному оснащению, к настоящему времени, ТНК облада-

ет рядом уникальных эксплуатационных качеств, что резко расширяет область его применения в промышленности, на транспорте, в энергетике, строительстве.

Наиболее интересная система теплового контроля электрооборудования метрополитена описана в работе Ю. И. Плотникова, Ю. М. Федоришина, В. Ф. Грачева «Мобильная тепловизионная система диагностирования электрооборудования в тоннелях Петербургского метрополитена» (журнал «Метро и тоннели» № 5, 2005). Большой интерес представляет опыт практического применения теплового контроля и комплекс технических средств. Однако в данной работе недостаточно подробно приведена технология теплового контроля объектов тоннельного хозяйства, например, пространственной разрешающей способностью, достаточно большой скоростью взаимного перемещения объектов контроля и тепловизионной камеры, влияния механической вибрации измерительной аппаратуры. Опыт решения данных задач в Московском метрополитене будет полезен для повышения эффективности практического применения ТНК.

Основные технические характеристики системы контроля (по результатам проектирования и экспериментальных натурных измерений)	
Минимальный выявляемый дефект с вероятностью 0,99 и изменением температуры 1,2°	13 × 13 мм
Рабочая (оптимальная) скорость перемещения тепловизионной системы	60 км/ч
Оперативное определение реального технического состояния объекта	имеется (с вероятностью 0,95)
Оценка остаточного ресурса функционирования объекта	имеется (для определенной номенклатуры электрооборудования)
Частота кадров	25 Гц
Поле обзора в плоскости изображений (на стенке тоннеля) в направлении, перпендикулярном скорости перемещения	700 мм
Расстояние от тепловизионной системы до плоскости изображения (стенки тоннеля)	2500 мм
Компенсация «смазанности» видеоизображения температурного поля	имеется (специальными программно-аппаратными средствами до взаимной угловой скорости 8,5 1/с)
Компенсация влияния вибрации и случайных отклонений (перемещений) тепловизионной системы в произвольной плоскости	имеется (специальными программно-аппаратными средствами)
Тепловизионная камера	Thermovision-550 (допускается применение другого типа с аналогичными техническими характеристиками)

Рис. 1. Схема с круговой разверткой: а – поле обзора или мгновенное линейное поле зрения (для круговой развертки); v – скорость перемещения; w – угловая скорость сканирования инфракрасного сканера; 1 – головной вагон метрополитена; 2 – стенка тоннеля; 3 – инфракрасный сканер с круговой разверткой; 4 – рельсы



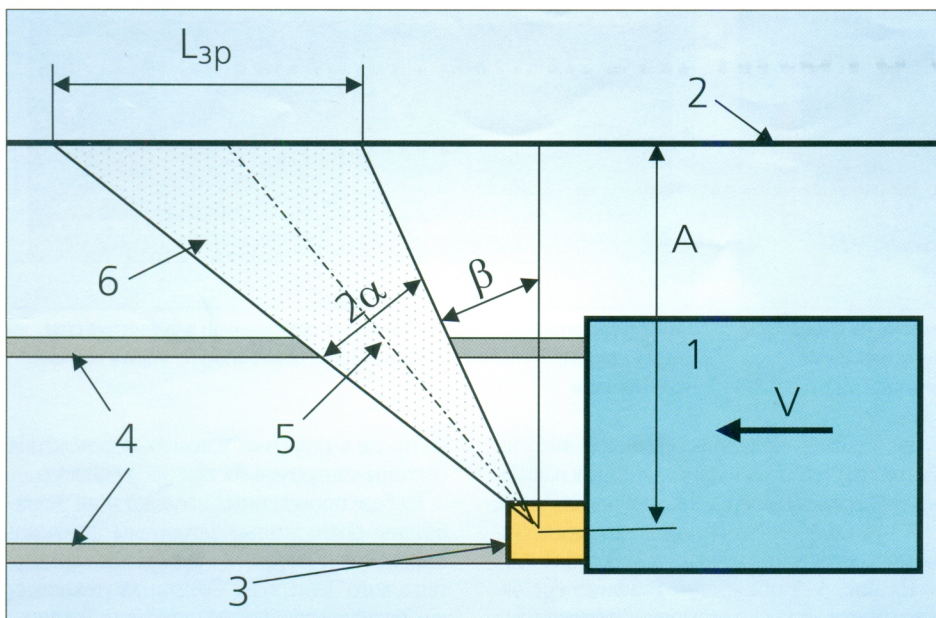


Рис. 2. Схема с покадровой регистрацией информации: 1 – головной вагон метрополитена; 2 – стенка тоннеля; 3 – тепловизионная система; 4 – рельсы; 5 – оптическая ось; 6 – поле обзора оптической системы

Во-первых, это касается пространственной разрешающей способности системы контроля и качества термограмм.

Проведенные расчеты показывают, что при описанном способе установки тепловизионной камеры и ее технических характеристиках *минимальная* геометрическая разрешающая способность на стенке тоннеля в расчете на элемент разрешения не может быть менее 4 мм. (В статье приведена величина геометрической разрешающей способности 1,5–2,0 мм). Учитывая, что в соответствии с теорией распознавания, применительно к тепловому (тепловизионному) контролю для достоверного обнаружения аномальных участков, должно существовать не менее трех-пяти рядом расположенных элементов, реальная геометрическая разрешающая способность не может быть менее 12–20 мм. При этом она возможна только при установке оптической оси тепловизионной камеры перпендикулярно стенке тоннеля. При положении тепловизионной камеры как описано в статье (судя по термограммам, под углом 45–60° к стенке тоннеля), геометрическая разрешающая способность увеличивается еще в 5–10 раз.

Следующей технологической задачей, требующей решения, является компенсация вибрации, возникающей при движении вагона. Трудности решения этой проблемы заключаются в случайности перемещения тепловизионной системы как во времени, так и в пространстве, а также амплитуды и частоты перемещения. Как показали исследования, данные факторы также оказывают влияние на достоверность результатов контроля, что практически может значительно их исказить.

Такой же важной технологической проблемой является компенсация угловой скорости перемещения объектов, расположенных на стенках тоннеля, относительно тепловизионной камеры. Известно, что при угловой скорости больше критической, зависящей от расстояния между тепловизионной камерой и объектом либо стеной тоннеля, скоростью

перемещения состава, требуемой разрешающей способностью, изображение будет «смазанным» и непригодным для дальнейшей обработки и дает недостоверную информацию об объекте контроля.

К организационным аспектам проведения теплового контроля следует отнести решение следующих задач: наличие аттестованных специалистов, лаборатории, методических материалов теплового неразрушающего контроля, соответствующей нормативной документации.

Эти и другие задачи решаются Технологическим институтом энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО» в процессе создания технологии теплового контроля объектов тоннельного хозяйства метрополитена совместно с Московским метрополитеном и Институтом машиноведения им. А. А. Благонравова РАН при содействии Ростехнадзора РФ. Авторы считают целесообразным поделиться накопленным теоретическим и экспериментальным опытом по обнаружению и распознаванию дефектов и диагностикой электротехники, так и тоннельного хозяйства по анализу их температурных полей, полученными результатами и проблемами, возникающими при решении данных задач, а также провести анализ результатов, полученных другими авторами.

Работы проводились в соответствии с Протоколом технического совещания от 15 января 2002 г., утвержденным главным инженером Московского метрополитена А. В. Ершовым «О возможности применения разработок Технологического института «ВЕМО» для температурного контроля кабелей, рельсов, дросселей в тоннелях метрополитена с помощью установки оборудования тепловизионной диагностики на вагоне-путеизмерителе» и согласованным техническим заданием на проведение указанной работы на участке «Планерная» – «Сходненская».

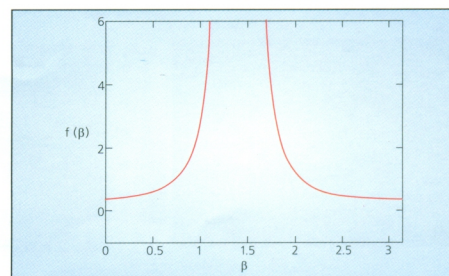


Рис. 3. Соотношения основных параметров технологического контроля

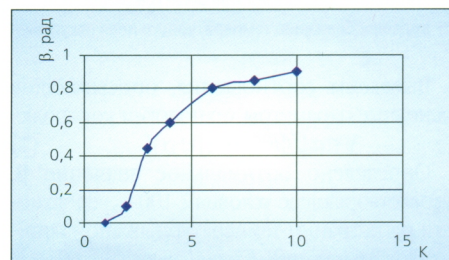


Рис. 4. Зависимость угла наклона тепловизора (β) от коэффициента наложения кадров (K)

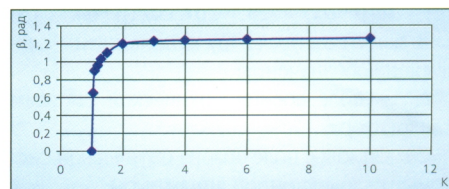


Рис. 5. Зависимость оптимального угла наклона тепловизионной системы к направлению движения от коэффициента наложения кадров

Проведенные исследования показали, что на качество результатов контроля наиболее сильно оказывают влияние первый и третий факторы. Они ограничивают скорость перемещения тепловизионной камеры на головном вагоне, достоверность обнаружения и распознавания дефектов контролируемого оборудования.

Проведенный анализ методик и технических средств теплового контроля перемещающихся объектов показывает, что в большинстве случаев применяются две основные схемы сканирования:

- **схема с круговой разверткой.** В этом случае развертка пространственного изображения формируется по одной из осей – за счет круговой развертки сканирующего луча, по второй оси – за счет продольного перемещения сканирующей системы вдоль объекта контроля;

- **схема с покадровой регистрацией информации.** Регистрация температурного поля осуществляется по кадрам, которые формируются внутренней системой тепловизионного устройства. Контроль объекта по всей площади осуществляется путем перемещения тепловизионной системы (и соответственно кадра).

Применительно к условиям контроля объектов метрополитена эти схемы представлены на рис. 1 и 2.

Ниже рассмотрены одни из наиболее важных – кинематические условия технологии обнаружения дефектов.

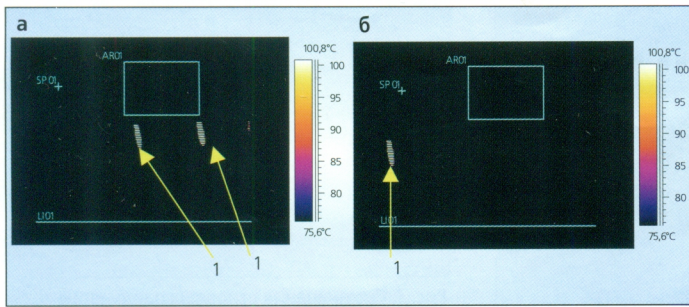


Рис. 6. Термограммы регистрации температурной аномалии на стенки тоннеля: а – при стандартной регистрации; б – по разработанной технологии; 1 – видеоизображение температурного поля искусственного дефекта

Выведены соотношения, описывающие основные параметры технологии контроля:

$$V < aAf / [FK \cos^2(\beta + \alpha)]. \quad (1)$$

Определено оптимальное значение β , удовлетворяющее условиям 100-% вероятности регистрации температурных аномалий:

$$Af[\lg(\beta + 2\alpha) - \lg\beta] / K = mAf / [F \cos^2(\beta + \alpha)], \quad (2)$$

или с учетом соотношения $m/F \cong 2\alpha$ получаем трансцендентное уравнение для определения β :

$$\lg(\beta + 2\alpha) - \lg\beta = 2\alpha K \cos^2(\beta + \alpha). \quad (3)$$

В зависимостях (1–3) использованы следующие обозначения:

$L_{зр}$ – поле зрения оптической системы тепловизора;

2α – угловое поле обзора оптической системы тепловизионной аппаратуры;

V – скорость перемещения тепловизионной системы;

β – угол наклона тепловизора;

A – расстояние от тепловизионной системы до контролируемой стены тоннеля (по нормали);

f – частота регистрации кадров тепловизионной системы;

F – фокусное расстояние оптической системы тепловизионной аппаратуры;

m – размер приемника лучистой энергии (матрицы) тепловизионной системы в направлении перемещения тепловизионной системы;

K – коэффициент наложения кадров (условие достоверного обнаружения дефектов).

На рис. 3–5 приведены графические зависимости, иллюстрирующие выведенные зависимости.

Проведенные стендовые экспериментальные исследования подтвердили выводы по определению оптимальных режимов теплового

Рис. 8. Видеоизображение температурного поля стенки тоннеля, зарегистрированное в процессе движения поезда: 1 – участок силового кабеля со сверхштатной температурой на контакте с дроссельной коробкой

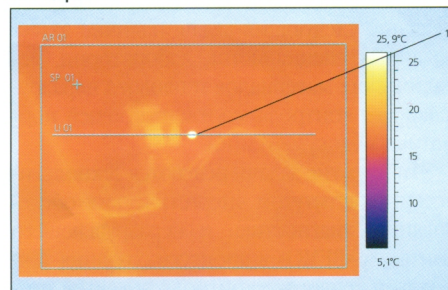


Рис. 7. Функциональная схема разработанных и испытанных программных средств контроля:

1, 2 – тепловизионные системы (например, Thermovision-550) – необходимы для контроля двух противоположных стен тоннеля одновременно; 3 – ИК сканер – для контроля контактного рельса; 4 – комплекс датчиков скорости и пройденного пути; 5 – монитор отображения информации тепловизионной и видеосистем; 6 – монитор отображения информации тепловизионной системы; 7, 8, 9 – специальные контроллеры; 10, 11 – ЭВМ регистрация и идентификация дефектов; 12, 13 – системы компенсации искажений; 14 – система регистрации цифрового видеоизображения

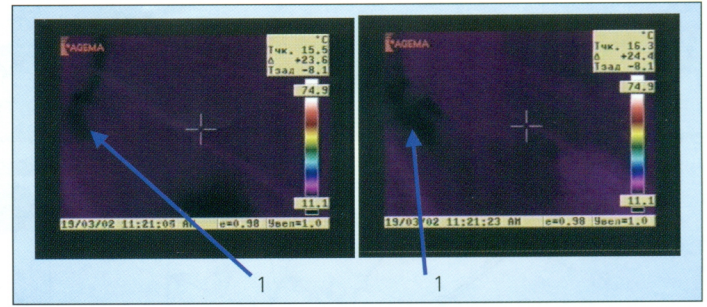
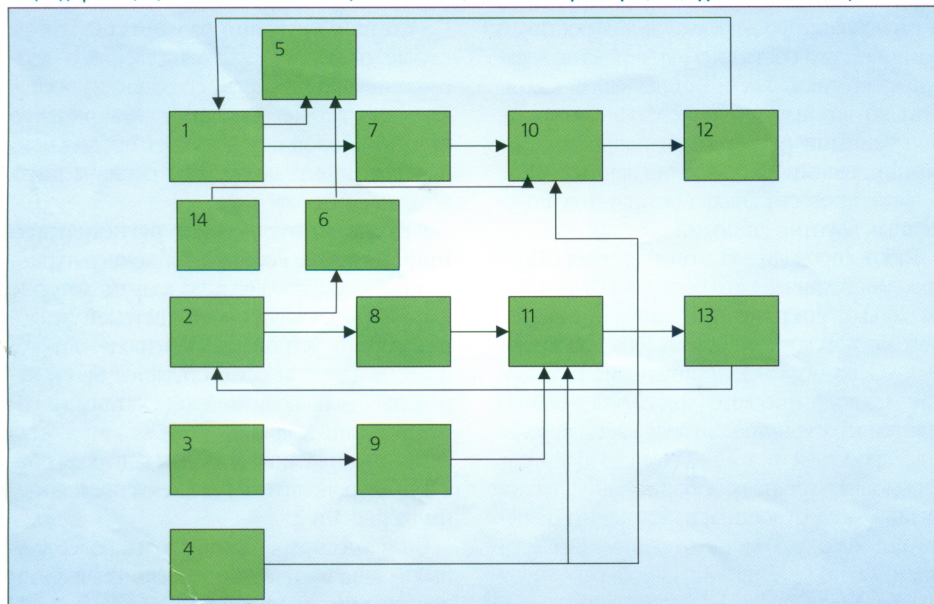


Рис. 9. Термограммы участков тоннеля с повышенной влажностью стен (после предварительной математической обработки): 1 – участки повышенной влажности

контроля в реальных условиях перемещения системы контроля в составе электропоезда.

На базе проведенных исследований разработаны оптимальные алгоритмы функционирования программно-аппаратных средств теплового контроля. Созданные технические решения защищены патентами России.

На рис. 6 представлены термограммы регистрации температурной аномалии на стенки тоннеля при скорости перемещения электропоезда 60 км/ч при стандартной регистрации и по разработанной технологии.

Из рис. 6а видно, что стандартная регистрация приводит как к «смазыванию» изображения, так и к его удвоению (что согласуется с разработанной выше теорией). В соответствии с разработанными алгоритмами (рис. 6б) обеспечивается достоверная качественная регистрация температурных аномалий, пригодная для дальнейшей обработки (определение реального технического состояния объекта, оценка остаточного ресурса его функционирования и т. п.).

На рис. 7 приведена функциональная схема разработанных и испытанных программно-аппаратных средств контроля.

Программное обеспечение регистрации и обработки видеоизображений температурных полей реализовано в виде пакета системных и прикладных программ «ELEKTRO-WEMO», функционирующего в системе Windows.

Результаты натурных испытаний технологии и программно-аппаратных средств приведены на рис. 8 и 9.

Выводы

1. Разработана технология теплового (тепловизионного) неразрушающего контроля и диагностики технического состояния объектов тоннельного хозяйства метрополитена в реальном времени движения поезда с учетом реальных условий контроля – вибрации, большой скорости перемещения и т. п.

2. Экспериментальные и натурные испытания подтвердили эффективность созданной технологии, алгоритмов и программ обработки информации и программно-аппаратных средств.

3. Необходимо объединить научные и производственные силы Московского, Петербургского метрополитенов и других организаций для создания автоматизированной диагностики тепловых режимов в тоннеле метрополитена.

Метро *и* тоннели

№ 2

апрель 2006

