

УДК 621.314/.316.004.5:621.384.3

## Контроль электротехнических установок с помощью инфракрасной термографии

*В железнодорожных электрических установках, промышленности и в энергетических компаниях контроль электротехнических установок с помощью инфракрасных измерений стал обычным элементом системы профилактических испытаний. Этот метод находит такое широкое применение благодаря экономичности, универсальности и достоверности результатов измерения.*

Тепловизионные измерения в электрических распределительных устройствах всех классов напряжения энергетические компании применяют уже более 20 лет как классический метод технической диагностики. На промышленных предприятиях высокая эксплуатационная готовность электрических установок, а следовательно, и систем электроснабжения обеспечивается благодаря регулярному контролю с помощью высокопроизводительных систем на базе инфракрасной техники.

Эти методы могут быть использованы и уже частично применяются для профилактических работ по техническому обслуживанию устройств тягового электроснабжения дальних и пригородных линий, городских железных дорог, метрополитена и трамвая. Возможна разработка единого метода профилактического контроля трансформаторов, секционных выключателей, выпрямителей или контактных подвесок. С помощью инфракрасных устройств возможны также измерения на токоприемниках с угольными вставками. Уже после вторых термографических испытаний доля отказов компонентов электротехнических устройств снижается на 80 %.

Указанные испытания должны также проводиться перед сдачей в эксплуатацию новых электротехнических устройств. Профилактические испытания инфракрасными методами значительно снижают опасность возникновения пожаров и поэтому фигурируют во многих противопожарных инструкциях как обязательные.

### Цели применения и полезный эффект

Тепловидение, или термография, представляет собой удобный и точный метод измерений и делает возможным исследование и оценку состояния электротехнических установок, что нельзя было реализовать традиционными средствами. Некоторые ви-

ды измерений выполнялись, но требовали значительных затрат рабочего времени и средств. Тепловизионные измерения проводятся на работающем оборудовании, т. е. когда установки находятся под напряжением. Термография относится к разряду методов обеспечения безопасности и согласно стандарту DIN VDE 0105 должна использоваться для регулярно проводимых ревизий с целью:

- документирования состояния установок и оценки потенциальных рисков;
- ранней локализации слабых мест и повреждений;
- повышения эксплуатационной готовности и надежности установок;
- исключения возможности сопутствующих отказов при аварийных ситуациях;
- снижения возможности пожара и несчастных случаев с людьми.

Подробное описание термографических приборов для контроля электротехнических установок приведено в проекте стандарта VdS 2858.

Термография не заменяет обязательных испытаний, проводимых другими методами, а также осмотров, проверки работоспособности и измерения токовой нагрузки, которые должны проводиться в рамках регулярных профилактических испытаний. Контроль плотности винтовых и болтовых соединений с помощью термографии позволяет выявить недостаточную затяжку и своевременно устранить слабое место. Как правило, для обеспечения длительной работоспособности присоединения контроль производится путем полной разборки соединения, зачистки контактных поверхностей, нанесения защитной смазки и последующей затяжки, желательна динамометрическим ключом.

### Термографические системы

После открытия инфракрасного излучения в 1800 г. и создания первой инфракрасной камеры в 1929 г. эта техника претерпела значительные изменения. После нефтяного кризиса в 1973 г. интерес к инфракрасной технике значительно повысился в связи с тем, что с ее помощью стало возможным определение мест утечек тепла в зданиях и промышленных установках. Именно в этот период инфракрасная техника получила широкую известность.

Первая промышленно изготовленная инфракрасная камера, дающая тепловизионное изображение,

появилась в 1960 г. в Швеции. Она весила 43 кг и охлаждалась жидким азотом. С течением времени камеры становились более легкими и высокопроизводительными. В конце 1980-х годов была создана камера, которая не требовала охлаждения жидким азотом, а использовала такие наиболее современные по тому времени и компактные системы, как охладитель Стирлинга или термоэлектрическое устройство охлаждения, работающее на базе использования эффекта Пельтье. Благодаря этому камера значительно упростилась и стала удобнее в эксплуатации. Камеры этого поколения относились к разряду сканирующих. Это значит, что снимаемое тепловизионное изображение с помощью оптики, зеркал и системы призм зондировалось лучом по горизонтали и вертикали. При этом сигнал от каждой точки изображения воспринимался глубокоохлаждаемым детектором и усиливался с помощью электронной схемы. Благодаря частоте повторения изображения 20 Гц человеческий глаз так же, как и в случае телевизионного изображения, не фиксирует процесса сканирования и поэтому воспринимает целостную картину.

Современные термографические системы не требуют охлаждения. Размеры термографической камеры не больше, чем видеокамеры, масса 2,5 кг, что обеспечивает большую гибкость ее применения. В качестве чувствительного элемента в ней используется микроболометр, не требующий охлаждения. С помощью оптики он создает инфракрасное изображение, качество которого приближается к фотографии благодаря высокой разрешающей способности. В камере могут отображаться объекты, имеющие температуру от  $-40$  до  $+2000$  °С с частотой повторения изображения 50 Гц.

С помощью современной инфракрасной камеры возможно также получение изображений движущихся объектов. Как и в фотоаппарате, камера обеспе-

чивает возможность увеличения отдельных фрагментов изображения. Однако здесь не используется объектив с изменяемым фокусным расстоянием. Применяемые в термографической камере объективы с постоянным фокусным расстоянием калибруются по температуре.

Принцип действия камеры заключается в том, что инфракрасные лучи, испускаемые любым предметом при температуре выше абсолютного нуля, через специальную оптику и микроболометр воспринимаются камерой. Получаемые сигналы усиливаются, обрабатываются и передаются на цветной видеомонитор. Имеющееся в камере микропроцессорное устройство присваивает определенный цвет каждой точке изображения, соответствующей одному результату измерения температуры. Совокупность этих точек образует термографическое изображение объекта. Полученное изображение оценивается и помещается в память.

Цифровое термографическое изображение получают с помощью специального программного обеспечения. В результате термографического контроля электротехнических установок клиент получает отчет с локализацией слабых мест, подтверждаемой цифровыми фотографиями. Для оценки степени повреждений разработана система их классификации, используемая компаниями, эксплуатирующими электротехнические установки.

### Примеры применения

#### Установки низкого напряжения, места соединения медных и алюминиевых шин

При термографических измерениях в установках низкого напряжения часто обнаруживают, что в местах соединения шин температура значительно выше, чем в удаленных от них зонах.

Измерения, проведенные в одной из таких установок, показали, что в одном из шинных соединений температура значительно выше, чем в других. Условия эксплуатации позволили устранить обнаруженный дефект лишь через год. За это время при неизменной нагрузке температура увеличилась вдвое и достигла 136 °С. Пересчет результатов измерений на номинальную нагрузку показал, что температура могла вырасти до 300 °С (таблица).

При проведении ремонта выяснилось, что на обеих контактных поверхностях соединения имели место изменение цвета и окисление.

#### Трансформаторы

При термографическом контроле трансформатора 20/0,4 кВ было обнаружено, что температура на одном из высоковольтных вводов на 30 К выше, чем

Режимы нагрузки и результаты термографических измерений в установке низкого напряжения

Параметр	Шина		
	L1	L2	L3
Номинальный ток, А	1000		
Ток во время измерений, А	500		
Нагрузка, %	50		
Максимальная температура объекта, °С	136	35	
Измеренное превышение температуры, К	101	—	
Возможная температура при номинальном токе, °С	300	—	
Группа дефекта по четырехбалльной шкале	4	—	

на других. Анализ полученного термографического изображения позволил сделать вывод о том, что дефект находится внутри бака. Результаты химического анализа газов в баке подтвердили это предположение. На основании полученных данных трансформатор был выведен в ремонт во избежание более тяжелых повреждений.

Благодаря термографическому контролю трансформатора 110/10 кВ удалось локализовать еще более серьезный дефект. При вскрытии бака обнаружилось, что винтовое крепление внутренней шины к токовводу за время многолетней эксплуатации ослабло. В результате медный соединитель перегорел, что могло привести к полному выходу и даже разрушению трансформатора. Расчеты, выполненные специалистами, показали, что благодаря термографическому контролю удалось избежать затрат, которые могли составить 0,5 – 0,7 млн. евро.

#### *Низковольтные установки малой мощности, клеммные колодки, предохранители*

Нередко электрические установки выходят из строя из-за дефектов, которые трудно обнаружить, например в результате нагрева винтового соединения в клеммной колодке. Такой дефект не был обнаружен при визуальном осмотре, так как пластмассовый изолирующий наконечник еще не изменил своего цвета. Причиной было ослабление винтового соединения, которое привело к повышению температуры до 94 °С. Поскольку такие дефекты трудно обнаружить невооруженным глазом, они могут быть локализованы лишь с помощью термографического контроля. Этот метод позволяет обнаружить ослабление винтов в клеммной колодке еще в начальной стадии, благодаря чему на устранение дефекта не потребуются значительных затрат времени.

При термографическом контроле распределительного щита было обнаружено повышение температуры прижимной пружины предохранителя и связанного с ним вывода автоматического выключателя. Эти дефекты также не были замечены при осмотре. Температура пружинного контакта предохранителя составляла уже 403 °С, в результате чего на металле появились цвета побежалости, а пластмассовая колодка заметно деформировалась.

Если температура на каком-либо элементе схемы повышается до такого уровня, как в рассмотренном примере, он обязательно подлежит замене, так как образовавшийся в данном случае на предохранителе слой окиси значительно повышает переходное сопротивление.

Нагрев выводов автомата защиты также способен привести к его отказу, что может вызвать аварийное отключение всей установки.

#### *Установки среднего напряжения*

В сетях среднего уровня напряжения также возможны отказы, вызывающие недопустимый нагрев элементов схемы. В таких установках в текущей эксплуатации невозможен иной контроль, кроме осмотров. Более детальная проверка проводится только при полном снятии напряжения. Если она отключается в результате аварии, это может вызвать остановку отдельных производств или всего предприятия.

В связи с этим очевидно, что и в установках среднего уровня напряжения необходим регулярный термографический контроль. Оборудование, экранированное металлическим кожухом, контролировать этим методом без вскрытия экрана нельзя. В распределительных устройствах есть ячейки, которые невозможно открыть, если они находятся под напряжением. Их оборудуют специальным глазком, через который можно вести термографические измерения.

В ходе термографического контроля трансформатора тока в сети напряжением 20 кВ было обнаружено повышение температуры на его выводах. Последующий осмотр этих элементов показал, что они находятся в нормальном техническом состоянии. Отсюда был сделан вывод, что дефект находится внутри. Его нельзя было обнаружить при осмотре и устранить путем затяжки винтового соединения. Внутренний дефект трансформатора тока, корпус которого отформован из литевой смолы, мог привести к взрыву под действием накопившихся газов.

#### *Высоковольтные установки*

Высоковольтные установки, как правило, являются компонентами открытых распределительных устройств, поэтому они постоянно подвержены влиянию жары, мороза, влажности и других природных факторов. Здесь также возможен только зрительный контроль, т. е. регулярные осмотры оборудования. В системе тягового электроснабжения распределительным устройствам напряжением 110 кВ, расположенным на подстанциях, которые питают линии тягового электроснабжения большой протяженности, уделяется особое внимание. В случае выпадения такого устройства прерывается эксплуатационный процесс на больших участках железнодорожных линий.

Организация текущего содержания оборудования по его состоянию будет наиболее эффективна в случае использования методов термографического контроля, которые обеспечивают быструю и надежную помощь, не требующую больших затрат.

В распределительном устройстве напряжением 110 кВ при термографическом исследовании комбинированного трансформатора тока было обнаружено местное повышение температуры на 10 К. Измерение проводилось при нагрузке, составлявшей 60 %

номинальной. Интерполирующий расчет показал, что при номинальной нагрузке температура повысилась бы до 70 °С.

С помощью термографического контроля высоковольтной линии напряжением 110 кВ удалось обнаружить лопнувшую соединительную клемму алюминиевого провода. При нагрузке, составлявшей 20 % номинальной, температура клеммы была 61 °С. Это значит, что при полной нагрузке она достигла бы 360 °С. Без использования термографии дефект могли бы заметить лишь при плавлении алюминиевой клеммы.

## Выводы

С точки зрения надежности и безопасности электрифицированных железных дорог и электротехнических установок польза термографических измере-

ний несомненна. Во всех распределительных устройствах под действием высоких передаваемых нагрузок и значительных переходных сопротивлений в соединениях возможен местный перегрев элементов оборудования, который может привести к искрению, загоранию и оплавлению. Любое из используемых разъемных соединений (винтовое, штекерное или прессовое) может оказаться дефектным. С помощью термографической техники можно быстро и надежно контролировать винтовые или штекерные соединения трансформаторной ошиновки, опрессованные кабельные наконечники или соединения несущего троса контактной подвески, места стыковки шин и т. д. Термография делает видимым то, что недоступно человеческому глазу. Локализация дефектов позволяет оперативно устранять их и тем самым предотвращать более тяжелые аварии.

S. Krüll. *Elektrische Bahnen*, 2004, № 1/2, S. 74 – 78.

УДК 621.332.6:621.316.37.048:621.315.618

# Распределительное устройство с газовой изоляцией на посту секционирования

*На посту секционирования Грибнице железных дорог Германии (DBAG) впервые было применено распределительное устройство на напряжение 15 кВ с газовой изоляцией. Оно обладает определенными преимуществами перед используемыми на DBAG распределительными устройствами с воздушной изоляцией, предназначенными для внутренней установки, и хорошо зарекомендовало себя на многих тяговых подстанциях переменного тока с частотой 50 и 60 Гц.*

С 1984 г. на DBAG в системе тягового электроснабжения применяются распределительные устройства типовой конструкции — однополюсные на напряжение 15 кВ с воздушной изоляцией, предназначенные для внутренней установки. При этом соблюдалась высокая степень стандартизации как на строящихся, так и реконструируемых распределительных устройствах (РУ).

На DBAG ко всем РУ предъявляются требования высокой эксплуатационной готовности в сочетании с минимальными затратами на текущее содержание и обеспечением максимальной безопасности для обслуживающего персонала. С целью уменьшения затрат потребовалось разработать распределительное устройство для системы тягового электроснабжения переменного тока частотой 16,7 Гц на базе уже вы-

пускаемых промышленностью компонентов с газовой изоляцией. Такая аппаратура с 1997 г. широко использовалась в установках тягового электроснабжения переменного тока частотой 50 – 60 Гц среднего напряжения.

В 1998 г. компания Siemens предложила на базе прошедшего типовые испытания стандартного трехполюсного распределительного устройства типа 8DA10 среднего напряжения со стандартизованным интерфейсом создать для системы тягового электроснабжения напряжением 15 кВ переменного тока частотой 16,7 Гц однополюсное распределительное устройство с газовой изоляцией, оборудованное испытательной шиной.

Поставляемое промышленностью однополюсное устройство типа 8DA/DB в модульном исполнении не потребовало значительной доработки для условий тягового электроснабжения при токе частотой 16,7 Гц, однако значительный объем работ пришлось выполнить по системам защиты и управления.

Для установки нового распределительного устройства с газовой изоляцией был выбран строящийся пост секционирования Грибнице в районе Берлина (рисунок). Он соединяет контактные сети магистральных линий, идущих от Магдебурга и Дессау, с берлинским направлением. Новый пост включен между тяговой подстанцией Гольм и постами сек-