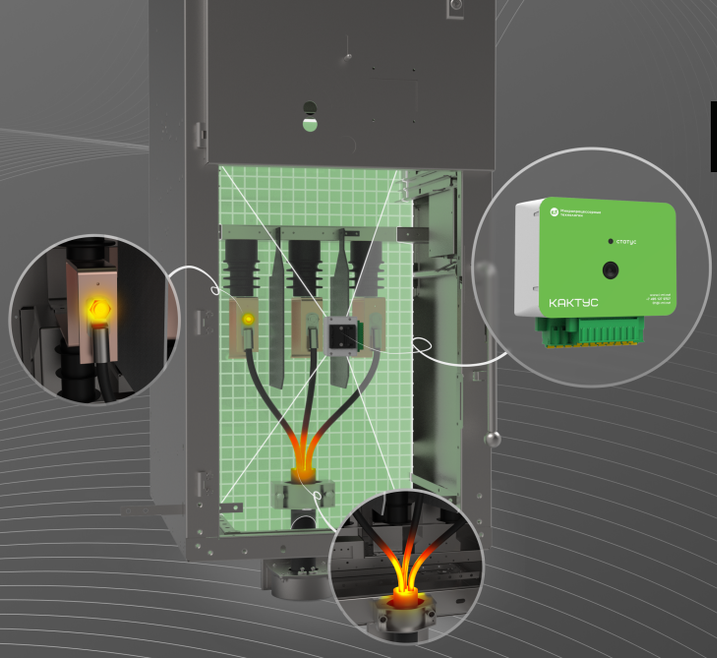
ООО НПП
«Микропроцессорные технологии»

Автор
Генеральный директор Пирогов М. Г.



www.i-mt.net
8 800 555-25-11
01@i-mt.net

Автоматический контроль нагрева токоведущих частей с учётом температуры окружающего воздуха

Как алгоритм «Превышение температуры» дополняет «Контроль перегрева» в тепловизионном реле КАКТУС

Пример – контактное соединение нагрето до **60 °C.** При температуре воздуха +30 °C его превышение над окружающей средой составляет 30 °C, а при 0 °C — уже 60 °C. Температура объекта одинакова, но тепловое состояние относительно среды различается существенно. Системы термомониторинга предыдущего поколения с пороговой уставкой (например, 70 °C) не различат эти ситуации по условиям пуска: порог не достигнут в обоих случаях.

В КАКТУСе эту задачу решает алгоритм **«Превышение температуры»:** температура каждого пикселя тепловизионной матрицы сопоставляется с температурой воздуха, полученной от внешнего температурного NTC-датчика. Новый критерий не заменяет алгоритм «Перегрев», а дополняет его [2, разд. 4.2]. **Инженерная ценность решения — в возможности обнаружить повышенный нагрев относительно среды, не дожидаясь достижения фиксированной критичной температурной уставки.**

1. ЧТО ПОКАЗЫВАЕТ РАЗНОСТЬ ТЕМПЕРАТУР

Основная величина алгоритма — превышение температуры объекта над температурой окружающего воздуха:

$$\Delta T = T_{об} - T_{возд} \tag{1}$$

Здесь $T_{об}$ — температура контролируемой поверхности, $T_{возд}$ — опорная температура воздуха, °C.

Для объяснения связи с состоянием контактного соединения рассмотрим упрощённую тепловую модель. Мощность электрических потерь определяется выражением:

$$P = I^2 R_K \tag{2}$$

где I — ток через соединение, $R_к$ — его электрическое сопротивление. Если теплоотвод представить эквивалентным тепловым сопротивлением R_θ, а тепловую инерцию — теплоёмкостью C_θ, баланс энергии имеет вид:

$$C_\theta \cdot dT_{об} / dt = I^2 R_K - (T_{об} - T_{возд}) / R_\theta \tag{3}$$

В установившемся режиме левая часть равна нулю, поэтому:

$$\Delta T_\infty = I^2 R_K R_\theta; \quad T_{об} = T_{возд} + \Delta T_\infty \tag{4}$$

В этой модели R_θ объединяет теплоотвод через соседние проводники, конвекцию и излучение. Замена всех путей теплообмена одним сопротивлением — приближение для сопоставимых условий охлаждения.

ЛОКАЛЬНЫЕ ПОТЕРИ МОГУТ РАСТИ БЕЗ УВЕЛИЧЕНИЯ ТОКА

Пусть ток равен 630 А, сопротивление соединения — 50 мкОм, а условное тепловое сопротивление — 1 К/Вт. Потери составят $630^2 \times 50 \times 10^{-6}$ = **19,8 Вт,** а установившееся превышение — около 19,8 °С. При увеличении сопротивления до 100 мкОм потери и превышение возрастут вдвое: до **39,7 Вт и 39,7 °С.** Ток при этом может оставаться прежним.

Отсюда следует важное различие: контроль тока и контроль локального нагрева не равнозначны. В рассмотренном примере электрическая нагрузка не изменилась, но тепловыделение в соединении выросло в два раза. При температуре воздуха 0 °С объект будет иметь около 40 °С, а при +35 °С — около 75 °С. Одно и то же тепловыделение даёт разный результат сравнения с фиксированной уставкой 70 °С.

Вычитание температуры воздуха устраняет прямое влияние её общего сдвига в рамках модели.

2. НОРМАТИВНАЯ ОСНОВА: ДВА РАЗНЫХ ПОКАЗАТЕЛЯ

Приложение Д СТО 34.01-23.1-001-2017 различает превышение относительно воздуха и избыточную температуру относительно аналогичных узлов других фаз в сопоставимых условиях. Это разные диагностические величины [1, п. 4]. Отдельные пределы таблицы Д.1 для работы в воздухе приведены ниже.

Таблица 1. Отдельные нормативные значения по СТО, таблица Д.1 [1, с. 255–256]

Контролируемый узел	Предельная температура, °С	Предельное превышение, °С
Контакт без покрытия: медь или медный сплав	75	35
Болтовое соединение без покрытия: медь, алюминий, их сплавы	90	50
Болтовое соединение с оловянным покрытием: те же материалы	105	65

Табличные значения применяют при отсутствии иных норм для конкретного оборудования. Для контактов и болтовых соединений при нагрузке 0,6–1,0 $I_{ном}$ превышение приводят к номинальному току; при 0,3–0,6 $I_{ном}$ используют избыточную температуру с пересчётом к 0,5 $I_{ном}$ [1, пп. 6, 7].

3. ПОЧЕМУ НУЖНЫ ОБА ТЕМПЕРАТУРНЫХ КРИТЕРИЯ

Сравним условные уставки 70 °С для контакта и 40 °С для превышения относительно температуры окружающей среды.

Таблица 2. Дополняющее действие двух критериев

Расчётная ситуация	Воздух, °С	Объект, °С	ΔT, °С	Пуск по T > 70 °С	Пуск по ΔT > 40 °С
Значительный нагрев в холодном воздухе	0	50	50	Нет	**Да**
Умеренный нагрев в тёплом воздухе	35	60	25	Нет	Нет
Высокая температура при горячем воздухе	45	75	30	**Да**	Нет

В первой строке критерий ΔT обнаруживает нагрев до достижения 70 °С. В третьей строке превышение невелико, но температура объекта уже выше выбранного предела: здесь работает классический алгоритм «Перегрев». **Критерии дополняют друг друга.**

При объединении двух условий по логике «ИЛИ» температурная граница комбинированного пуска определяется как:

$$T_{гр}(T_{возд}) = min[T_{уст};\ T_{возд} + \Delta T_{уст}] \quad (5)$$

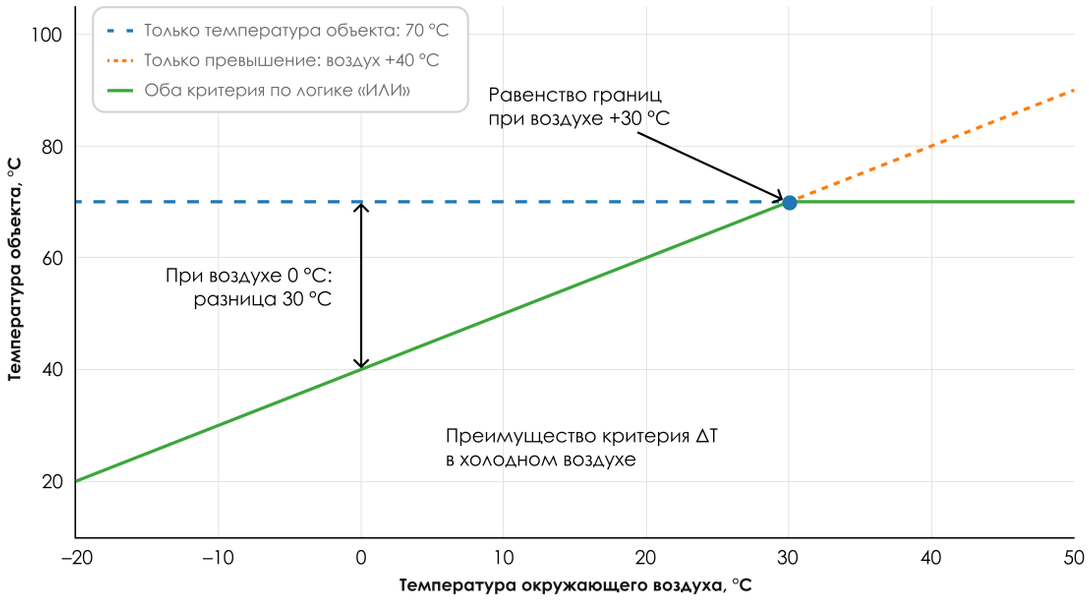


Рисунок 1. Расчётные границы пуска при уставках 70 °C и ΔT = 40 °C. При температуре воздуха ниже +30 °C границу срабатывания определяет превышение относительно температуры окружающей среды, если температура воздуха выше +30 °C — температура контактного соединения. Совпадающие участки линий перекрываются

При температуре воздуха 0 °C граница снижается с 70 до 40 °C. В холодных условиях эксплуатации при неизменном Rθ защита, действующая на превышение температуры окружающего воздуха, оказывается на **43 % чувствительнее** классической защиты по превышению абсолютной температуры: 1 − 40/70 ≈ 0,43.

Комбинированное использование двух алгоритмов сохраняет ограничение температуры объекта и учитывает холодные условия его эксплуатации.

ΔT не отменяет срабатывания абсолютной ступени, а повышает чувствительность защиты при эксплуатации в холодных условиях окружающей среды

4. ПЕРСПЕКТИВА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Даже после вычитания температуры воздуха остаётся зависимость от тока. Из формулы (4) при неизменных Rк и Rθ следует:

$$\Delta T(I) = \Delta T_{ном} \cdot (I/I_{ном})^2 \qquad (6)$$

При уменьшении тока до 70 % тепловыделение в этой модели падает до 49 %, а при 50 % — до 25 %. Поэтому отсутствие температурного сигнала при небольшой нагрузке нельзя считать достаточным подтверждением исправности соединения.

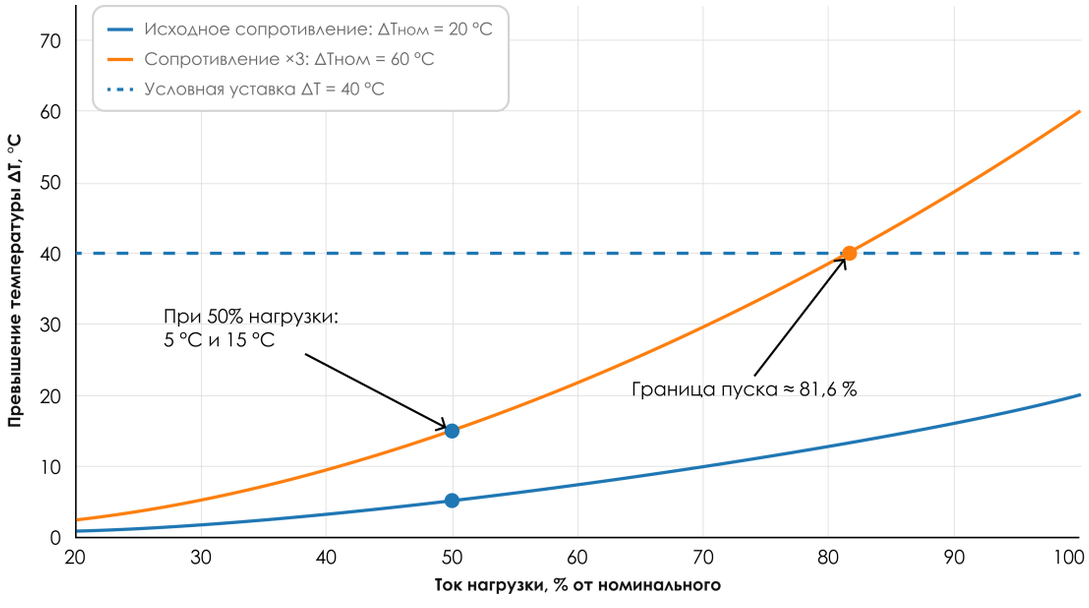


Рисунок 2. Расчётное влияние нагрузки при неизменном теплоотводе. Для исходного сопротивления ΔT при номинальном токе равно 20 °C; при сопротивлении в три раза выше — 60 °C. Горизонталь 40 °C — условная уставка, а не нормативная граница

В примере рисунка 2 при токовой нагрузке 50 % даже соединение с трёхкратным сопротивлением имеет превышение всего 15 °C — меньше, чем исходное соединение при номинальном токе. Уставку 40 °C такой узел достигает только примерно при 81,6 % номинального тока. Небольшое ΔT без данных о величинах тока может создавать ошибочное впечатление благополучного состояния.

Для предусмотренного стандартом диапазона нагрузки пересчёт к номинальному току записывается так [1, п. 6]:

$$\Delta T_{ном} = \Delta T_{раб} \cdot (I_{ном}/I_{раб})^2 \quad (7)$$

Например, 36 °C при токе 0,8 $I_{ном}$ соответствуют расчётным $36/0{,}8^2$ = **56,25 °C** при номинальной нагрузке.

Это отличный пример того, что в перспективных системах автоматического температурного контроля будет использована информация о протекающем токе присоединения. Но это, на момент 2026 года – пока является прекрасным будущим, в сторону которого такие системы получат развитие. Такой подход в комбинации с тепловой дифференциальной защитой будет чудесным решением заблаговременного выявления развивающихся дефектов и предотвращения аварий.

5. СКОЛЬКО ВРЕМЕНИ МОЖЕТ ДАТЬ БОЛЕЕ РАННЕЕ ОБНАРУЖЕНИЕ

Рассмотрим модель (3) после условного скачка мощности потерь при постоянной температуре воздуха. Считаем, что новое тепловыделение и теплоотвод далее не меняются – для упрощения не учитывается явление теплового разгона.

Для такой системы превышение приближается к новому установившемуся значению по экспоненте:

$$\Delta T(t) = \Delta T_\infty - (\Delta T_\infty - \Delta T_0) \cdot e^{-t/\tau} \quad (8)$$

Здесь ΔT_0 — начальное превышение, ΔT_∞ — конечное значение, $\tau = C_\theta R_\theta$ — тепловая постоянная времени. Время достижения границы $\Delta T_п$ при $\Delta T_0 < \Delta T_п < \Delta T_\infty$ составляет:

$$t_п = \tau \cdot \ln [(\Delta T_\infty - \Delta T_0)/(\Delta T_\infty - \Delta T_п)] \quad (9)$$

Зададим температуру воздуха +10 °C, начальное превышение 20 °C, конечное — 80 °C, постоянную времени 20 мин. Температура объекта растёт от 30 к 90 °C. При прежних условных уставках 70 °C и ΔT = 40 °C пуск по превышению происходит примерно через **8,1 мин**, а по температуре объекта — через **22,0 мин**. Таким образом, учет температуры окружающей среды в тепловой защите ускоряет выявление дефекта в 2,5 и более раз.

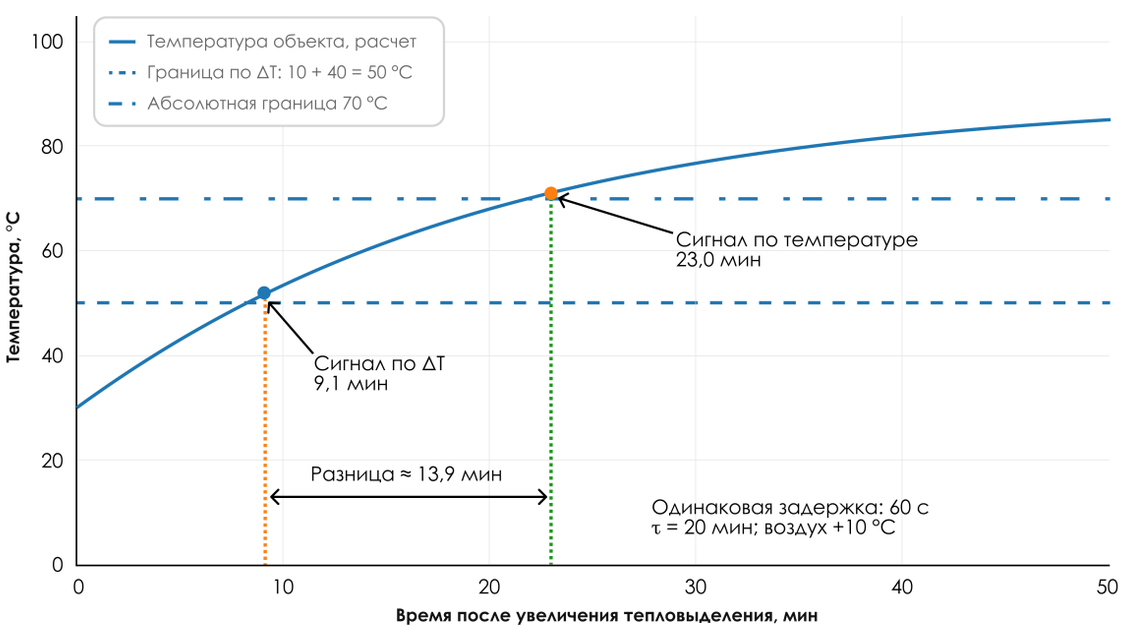


Рисунок 3. Расчётный пример времени обнаружения. При одинаковой задержке 60 с сигналы формируются через 9,1 и 23,0 мин; разница составляет около 13,9 мин

Практический смысл примера — показать, откуда может появиться дополнительное время для реакции. **Если конечная температура вообще не достигает абсолютной уставки, критерий ΔT может дать сигнал там, где абсолютная ступень не запустится.**

6. КАК АЛГОРИТМЫ РЕАЛИЗОВАНЫ В КАКТУСЕ

КАКТУС рассчитывает превышение для каждого пикселя относительно показания внешнего датчика NTC. В комплект входит пассивный датчик NTC, 10 кОм, с кабелем 1,5 м. Для алгоритмов «Перегрев» и «Превышение температуры» предусмотрены по две ступени: первая формирует предупреждение, вторая — аварийную сигнализацию.

Превышение уставки вызывает пуск ступени. Сигнал срабатывания появляется, если пуск сохраняется в течение заданной задержки. Коэффициент возврата устанавливается отдельно; для ступеней ΔT также отдельно задаётся разрешение действия на сигнализацию. Функция превышения указана для прошивки 2.0.1 и выше [2, разд. 4.2].

Таблица 3. Настройки по руководству КАКТУСа [2, табл. 4.1, 4.2]

Параметр	Диапазон настройки	Заводские значения 1-я / 2-я ступень
Уставка температуры объекта	0–120 °C; шаг 1 °C	70 / 90 °C
Уставка превышения ΔT	5–80 °C; шаг 1 °C	40 / 40 °C
Задержка каждой ступени	5–1800 с; шаг 1 с	60 / 60 с
Коэффициент возврата	10–100 %; шаг 1 %	95 / 95 %
Действие ступеней ΔT на сигнализацию	Включено / отключено	Отключено / отключено

При уставке ΔT = 40 °C и коэффициенте возврата 95 % расчётная граница возврата пускового органа равна **38 °C.**

Особенно важно, что по заводским настройкам действие обеих ступеней ΔT отключено. **Подключить NTC недостаточно:** нужно задать уставки, выдержки, ввести разрешение сигнализации и проверить её прохождение. Одинаковые заводские значения ΔT для двух ступеней также не заменяют проектного выбора уровней предупреждения и аварийного сигнала [2, табл. 4.2; разд. 5.12].

Для передачи информации предусмотрены два настраиваемых релейных выхода и RS-485 с Modbus-RTU или ГОСТ Р МЭК 60870-5-101-2006. Журнал на 400 записей сохраняет сведения о пикселе, времени, сработавших ступенях, уставках, длительности события, максимальной температуре и температуре окружающей среды. Это позволяет исследовать событие вместе с температурными условиями, а не только по факту появления сигнала.

7. ДАТЧИК ВОЗДУХА: ТОЧКА УСТАНОВКИ ВЛИЯЕТ НА РЕЗУЛЬТАТ

Алгоритм использует не абстрактную «температуру в помещении», а конкретное показание NTC. Поэтому проект должен определить, какой объём воздуха является опорной средой для контролируемого узла. Нельзя без обоснования подменять температуру внутри отсека показанием из соседнего помещения или считать локальный поток от обогревателя достоверной температурой всего отсека.

Рассмотрим объект с температурой 75 °C при опорной температуре воздуха 25 °C. Истинное относительно этой среды превышение равно 50 °C. Если NTC из-за размещения около источника тепла показывает 35 °C, алгоритм получит только 40 °C. Завышение показания воздуха на 10 °C уменьшило контролируемую разность ровно на 10 °C.

$$\varepsilon_{\Delta T} = \varepsilon_{об} - \varepsilon_{возд} \tag{10}$$

Здесь $\varepsilon_{об}$ и $\varepsilon_{возд}$ — ошибки соответствующих температурных значений, включая влияние условий установки. При точном тепловизионном показании положительное смещение NTC на b градусов уменьшает рассчитанное превышение на те же b градусов.

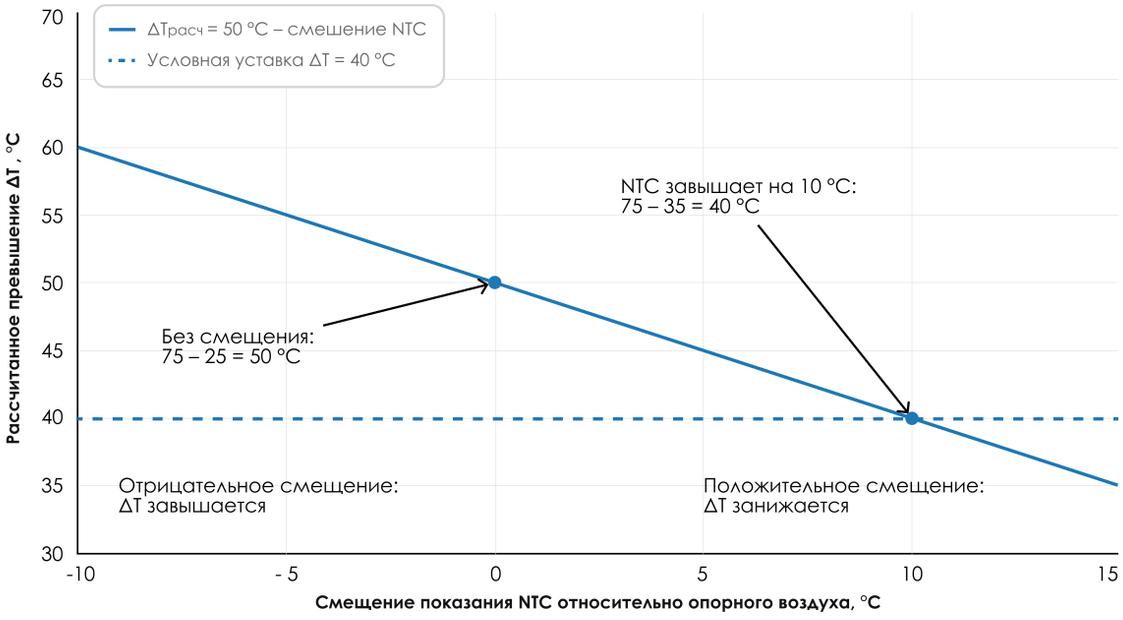


Рисунок 4. Расчётное влияние смещения показания NTC при температуре объекта 75 °C и опорного воздуха 25 °C. Завышение NTC на 10 °C снижает ΔT с 50 до 40 °C

Из этой зависимости следует инженерная рекомендация: датчик необходимо размещать в оптимальной точке выбранной воздушной среды, вне непосредственного влияния обогревателей, нагретого корпуса и локальных горячих потоков, не характеризующих эту среду. При этом не следует переносить датчик в искусственно более холодную область: такое размещение завысит ΔT.

Самодиагностика КАКТУСа контролирует NTC; при выявленной неисправности формируется соответствующий сигнал, а алгоритм «Превышение температуры» выводится из работы. Но электрически исправный датчик, установленный в неподходящем месте, не обязательно будет признан неисправным. Проверка места установки и контроль отказа решают разные задачи.

8. ЧТО НЕОБХОДИМО УЧЕСТЬ ПРИ ВВОДЕ В РАБОТУ

Уставки и погрешности
Порог предупреждения следует выбирать с учётом типа узла, его допустимых режимов, нагрузки и температурных условий. Предупреждение должно оставлять возможность для реакции, а не просто дублировать аварийную ступень. При этом порог нельзя назначать настолько близко к нормальному диапазону, чтобы на результат определяюще влияли погрешности и обычные колебания режима.

Поверхность объекта и геометрия измерения
По РЭ точность зависит от зоны матрицы, температуры эксплуатации и размеров объекта. Заявленные значения достигаются при коэффициенте излучения поверхности более 0,8; для низкоизлучающих поверхностей рекомендуется окрашивание.

Переходные режимы
Модель установившегося нагрева нельзя без оговорок применять сразу после изменения нагрузки или температуры воздуха. Если воздух быстро охладился, массивный объект некоторое время сохраняет прежнюю температуру, поэтому ΔT увеличивается даже без роста электрических потерь. Это нужно компенсировать задержкой на срабатывание ступени.

Для иллюстрации возьмём модель (3): объект имеет 55 °C при воздухе 30 °C, то есть ΔT = 25 °C. После условного мгновенного охлаждения воздуха до 10 °C при неизменных потерях превышение сначала составит 45 °C, а затем вернётся к 25 °C. При τ = 20 мин и пренебрежимо малой инерции NTC уровень 40 °C будет превышен около **5,8 мин.** Этот расчёт показывает, почему выдержка 60 с не позволит отстроить многоминутный тепловой переход и в целом должна составлять несколько минут.

Задержку следует согласовывать с динамикой оборудования и необходимым временем реагирования. Бесконтрольное увеличение выдержки ради подавления переходных сигналов может одновременно отложить обнаружение реального перегрева. При анализе события полезно сопоставлять температуру объекта, воздух, ток и состояние вентиляции.

Опробование всей цепочки
До ввода в эксплуатацию необходимо проверить не только расчёт ΔT, но и работу всей цепи предупредительной и аварийной сигнализации с доставкой информации оперативному персоналу. РЭ предусматривает проверку с нагретым предметом в центре поля зрения тепловизионной матрицы, контролем индикации, назначенных выходов и анализ записей в журнале реле.

9. ОТ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ К ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Основной результат применения второго критерия — обнаружение состояний, в которых объект уже значительно нагрет относительно воздуха, но фиксированная температурная уставка ещё не достигнута. При этом сохранение алгоритма «Перегрев» не позволяет утратить контроль температуры самого объекта в горячей окружающей среде.

Чтобы сигнал работал на предотвращение повреждения, он должен запускать определённую последовательность действий: получение и проверку сообщения, оценку нагрузки и условий охлаждения, уточнение причины, организацию осмотра или ремонта. Наличие сигнала без ответственного получателя и установленного порядка реагирования не обеспечивает устранения дефекта.

КАКТУС даёт техническую основу для такой работы: два температурных критерия, предупредительную и аварийную сигнализацию, передачу информации и журнал событий. Расчёты показывают, в каких условиях дополнительный критерий способен дать более ранний сигнал. Реальное снижение риска аварий определяется всей системой: правильным измерением, обоснованными уставками и своевременным действием эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ПАО «Россети». СТО 34.01-23.1-001-2017 «Объем и нормы испытаний электрооборудования». Приложение Д, пп. 4, 6, 7; таблица Д.1; с. 254–257. Использована редакция по указанному электронному источнику. Дата обращения: 28.09.2026. Электронный текст стандарта
2. НПП «Микропроцессорные технологии». КАКТУС. Тепловизионное реле защиты. Руководство по эксплуатации. Ревизия 21.09.2026. Комплект поставки; таблицы 3.4, 4.1, 4.2; разделы 4.1–4.4, 5.1, 5.3, 5.8, 5.12, 7.2. 41 с.



Михаил Пирогов

Генеральный директор
ООО НПП «Микропроцессорные технологии»

VK: vk.com/pirogovmg

Почта: pirogovmg@i-mt.net

СОЗДАЕМ
НАДЕЖНОЕ
БУДУЩЕЕ