

DOI: 10.71527/EP.EN.2026.09.008
УДК 621.311
EDN: ZSKAJO

РЗА нового поколения: термодиагностика помогает предупредить аварию в ячейках 6 – 35 кВ¹

Современная релейная защита должна не только правильно отключать повреждение, но и заранее определять снижение надёжности первичного оборудования.

Распределительные устройства с классом напряжения 6 – 35 кВ — важные элементы систем электроснабжения, как распределительных сетей, так и крупных промышленных предприятий, где внезапный отказ коммутационного аппарата — не просто локальная неисправность, а возможное каскадное отключение ответственных потребителей, простой производства и многомиллионные убытки. На повреждения контактных соединений приходится до 75 % всех отказов [1].

Традиционные методы контроля, такие как планово-предупредительные ремонты с полным снятием напряжения и визуальным осмотром оборудования, всё чаще демонстрируют свою несостоятельность: они трудоёмки, требуют вывода оборудования из эксплуатации и, что самое главное, часто пропускают стремительно развивающиеся дефекты, возникающие в межремонтный период. В такой ситуации применение предиктивной аналитики помогает своевременно выявить дефект на ранней стадии его развития до перехода оборудования в состояние аварии, и даже спрогнозировать остаточный ресурс узла, сохраняя схему электроснабжения. Одним из таких типов предиктивной аналитики является термомониторинг, а его заметным представителем — предиктивная автоматика «Мелиса» от НПП «Микропроцессорные технологии».

В табл. 1 приведены данные по числу базовых станций «Мелисса», терминалов РЗА с модулем беспроводной связи и точек контроля температуры, находящихся в эксплуатации.

Статистика свидетельствует, что технология термомониторинга контактных соединений вышла из стадии единичных внедрений и стала рабочим эксплуатационным инструментом.

Зарубежные коллеги также доверяют свои сети термомониторингу и применяют разные системы их мониторинга [2].

Следует отметить, что мониторинг температуры входит в перечень обязательных параметров контроля распределительного коммутационного оборудования напряжением до 35 кВ [2, 4].

Ключевая идея

Термодиагностика расширяет функционал РЗА, не ограничиваясь только фиксацией уже случившейся аварии, а дополняя реальным выявлением предаварийного состояния. Это позволяет службам эксплуатации снизить аварийность, потратив больше времени на анализ и плановые вмешательства.

Почему необходим мониторинг температуры контактов!

В РУ 6 – 35 кВ проблема начинается не с «высокой температуры вообще», а с роста переходного сопротивления в контактном узле. Китайские исследования по нагреву токоведущих соединений показывают, что на температуру контактных соединений решающим образом влияют контактное давление и ток нагрузки, а к факторам перегрева относят сопротивление контактов. Это важный инженерный вывод: температура в таком случае — не случайный побочный симптом, а прямой индикатор того, что контакт начинает деградировать [3].

Таким образом, датчик температуры — не просто измерительный элемент, а инструмент раннего предупреждения ухудшения контактного соединения, вместе с тем РЗА не ограничивается лишь функцией реагирования на аварийное состояние соединения, но и дополнительно становится системой предаварийного обнаружения дефекта. Это и есть качественный сдвиг, который делает применение термодиагностики новым этапом развития цифровых устройств РЗА [2, 3].

На рис. 1 приведена типичная логика процесса развития дефекта в контактном соединении: по вертикали — шкала относительного уровня в процентах деградации контакта — синяя линия, переходного сопротивления и локального нагрева — оранжевая и зеленая линии соответственно; по горизонтали — время развития дефекта в относительных единицах. В первой четверти графика наблюдается ухудшение состояния самого контакта, во второй виден рост переходного сопротивления, из-за чего происходит локальный нагрев (в третьей четверти графика зелёная линия искривляется вверх) и включается положительная тепловая обратная связь, то есть происходит самоускоряющийся процесс (крайняя четверть графика) — контакт продолжает деградировать, его температура растёт, что ещё сильнее усиливает деградацию, формируя своеобразный цикл.

Хотя контакт ещё не разрушен, но физические процессы значительно изменяются с течением времени, так как каждый такой цикл ускоряет следующий. Поэтому в процессе эксплуатации выигрывает не тот, кто просто обнаружил уже перегретый узел, а тот, кто заметил самое начало расхождения между однотипными контактами и успел вмешаться до перехода процесса в аварийную фазу.

Таблица 1

Базовые станции «Мелисса»	Терминалы РЗА с модулем радиосвязи	Точки контроля температуры
1780	540	23 452

Данные приведены на март 2025 г.

¹ На правах рекламы

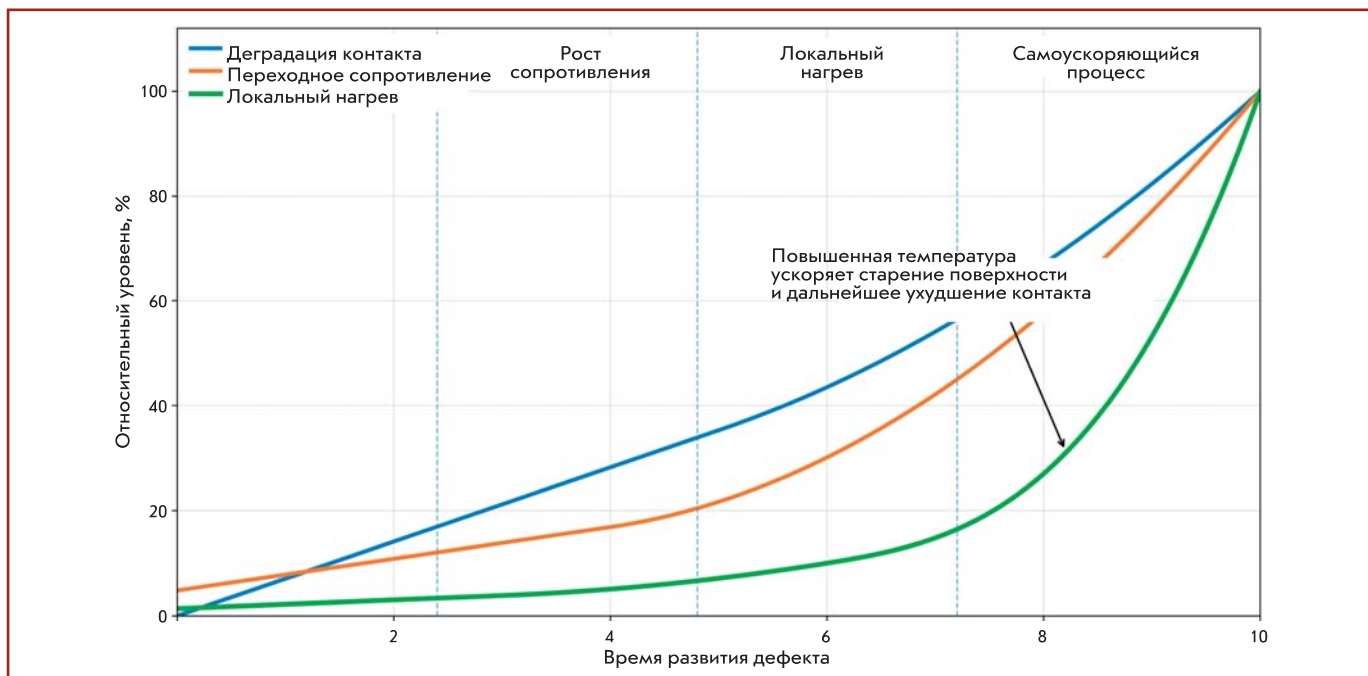


Рис. 1. Иллюстративная схема типовой динамики развития дефекта контактного соединения

Именно этим и определяется реальная ценность непрерывного мониторинга [3].

Практический вывод для эксплуатации

Если первопричина аварии в электроустановке заключается в ухудшении состояния контакта, то контроль температуры становится не вторичным измерением, а прямым способом увидеть развитие дефекта. Чем раньше замечено отклонение температуры контакта от нормальной, тем выше шанс ограничиться плановым ремонтом, а не ремонтом в результате аварии.

Математика теплового разгона

Далее представлена модель нагрева контактных соединений, основанная на данных исследований физики процесса. Она не является истинной полного теплового расчёта ячейки, но показывает логику происходящего [3].

$$C_T \frac{dT}{dt} = I^2 R_k T - G \Delta T, \quad (1)$$

где C_T — эквивалентная теплоёмкость узла, Дж/°С; $\frac{dT}{dt}$ — скорость изменения превышения температуры, °С/с; $\Delta T = T - T_{\text{окр}}$ — разность между температурой узла и температурой окружающей среды, °С; I — ток, проходящий через контакт, А; R_k — контактное сопротивление при текущей температуре узла, Ом; G — тепловая проводимость, Вт/°С.

Скорость нагрева соединения определяется как разница между мощностью, выделенной в месте контакта и отданной в окружающую среду. Пока разность небольшая, температура контакта растёт умеренно и может выйти на устойчивый режим. По мере того, как дефект в контактном соединении развивается, баланс между температурой в точке контакта и температурой окружающей среды начинает смещаться в худшую сторону.

$$R_k(T) = R_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (2)$$

где $R_k(T)$ — контактное сопротивление при конечной температуре, Ом; R_0 — контактное сопротивление при исходной

температуре (до начала нагрева), Ом; α — температурный коэффициент сопротивления (показывает на какую долю от начального значения изменяется сопротивление при нагревании на 1°С), 1/°С.

$$I^2 R_0 \alpha < G. \quad (3)$$

Если неравенство (3) выполняется, то узел способен выйти на стационарный режим. Если же $I^2 R_0 \alpha > G$, то каждый следующий градус при увеличении температуры вызывает такой прирост внутренних омических потерь на нагрев, который уже не компенсируется теплоотводом. Именно в этот момент в контактном соединении начинается *тепловой разгон* — аварийный лавинообразный процесс, при котором выделение тепла в контакте превышает его рассеяние в окружающую среду. Поэтому ожидание достижения в контактном соединении предельно допустимой температуры на поздней стадии развития дефекта означает сознательно дать дефекту развиваться с ускорением.

В этом и заключается главный механизм деградации контактного соединения: катастрофическом росте переходного сопротивления из-за ускоренной высокотемпературной коррозии (окисления). При повышении температуры скорость окисления металлов (меди, алюминия) растёт экспоненциально, далее на контактных поверхностях мгновенно образуется непроводящая оксидная плёнка, поэтому площадь истинного электрического контакта (пятен контактирования) стремительно сокращается, что приводит к локальному расплавлению металла, выгоранию соединения и полному разрыву цепи.

Почему это важно!

Тепловой разгон — не редкая случайность, а закономерный физический сценарий для дефектного контакта. Поэтому значение термодиагностики определяется не только тем, что с её помощью можно обнаружить дефект/перегрев, но и тем, насколько использование такой системы может определить начало его возникновения и развития.

Дифференциальная тепловая защита

Если по результатам контроля температуры узла по абсолютному её порогу можно ответить на вопрос: «узел уже слишком горячий?», то на более ценный для эксплуатации оборудования вопрос «какой именно узел в скором времени деградирует до критического значения?» способна «ответить» дифференциальная тепловая защита.

Данная защита, разработанная инженерами НПП «Микро-процессорные технологии», реализована в системе термомониторинга «Мелисса» и устройствах РЗА «Лютик-Плюс» и «Алтей-01» [8, 9].

Применение дифференциальной тепловой защиты позволяет выявить дефект контактного соединения раньше, чем контроль только по абсолютному порогу температуры.

На рис. 2 показано, что дифференциальный признак ΔT пересекает свою уставку раньше, чем абсолютная температура слабого контакта достигает аварийного порога.

В инженерном смысле « $t_2 - t_1$ » это и есть «выигранное время», которое можно использовать для анализа, подтверждения наличия дефекта и *планового вмешательства*. Именно этот запас времени чаще всего и отделяет предупредительный ремонт от аварийного восстановления.

$$T_i(t) = \theta(t) + \delta_i(t) + \eta_i(t), \quad (4)$$

где $T_i(t)$ — температура i -го датчика, °C; $\theta(t)$ — общий тепловой фон группы, °C; $\delta_i(t)$ — локальная аномалия конкретного контакта, °C; $\eta_i(t)$ — шум и погрешность измерения, °C.

Выражение (4) показывает, что в величине абсолютной температуры всегда присутствуют два слоя информации: об общем тепловом фоне (нагрузка, температура воздуха, общий нагрев ячейки) и о состоянии локального дефекта. Именно поэтому уставка по абсолютному перегреву неизбежно выставляется выше рабочего теплового фона, на уровне предельной допустимой температуры эксплуатации самого слабого элемента первичного оборудования. Следовательно, применение такого метода контроля всегда запаздывает по

времени, оказывается более поздним, чем в действительности нужно в эксплуатации.

$$dT = T_{\max} - T_{\min}, \quad (5)$$

где dT — относительный перегрев внутри группы, °C; $T_{\max}$, $T_{\min}$ — максимальная и минимальная температура в группе, °C, соответственно.

Формула (5) описывает сам дифференциальный признак, смысл которого заключается в сравнении ни одной точки с фиксированным порогом, а однотипных точек между собой. Это превращает систему из простого сигнализатора перегрева в инструмент выявления слабого места контактного соединения.

$$dT \sim (\delta_{\max} - \delta_{\min}) + (\eta_{\max} - \eta_{\min}), \quad (6)$$

где $\delta_{\max}$ и $\delta_{\min}$ — локальные температурные аномалии наиболее горячего и наиболее холодного контактов, °C; $\eta_{\max}$ и $\eta_{\min}$ — погрешности соответствующих измерений, °C.

Следует обратить внимание, что общий тепловой фон $\theta(t)$ в расчёте не учитывается. В этом заключается математическое преимущество дифференциальной тепловой защиты: из оценки исключаются фактор сезонности, общий нагрев ячейки и общий рост нагрузки. Остаётся только то, что важно при эксплуатации — локальное расхождение в величинах температуры однотипных контактов.

Абсолютное время до наступления термического разрушения (критической точки) контактного соединения при тепловом разгоне вычисляется по формуле:

$$t_{\text{абс}} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{T_{\text{уст}} - \theta}{\delta_0} \right), \quad (7)$$

где λ — скорость развития дефекта, $1/\text{ч}$; $T_{\text{уст}}$ — абсолютная уставка температуры, °C; θ — общий температурный фон группы, °C; δ_0 — начальная температурная аномалия дефектного контакта, °C.

Дифференциальное время до аварии, оценивающее остаточный ресурс контакта на основе скорости изменения тем-

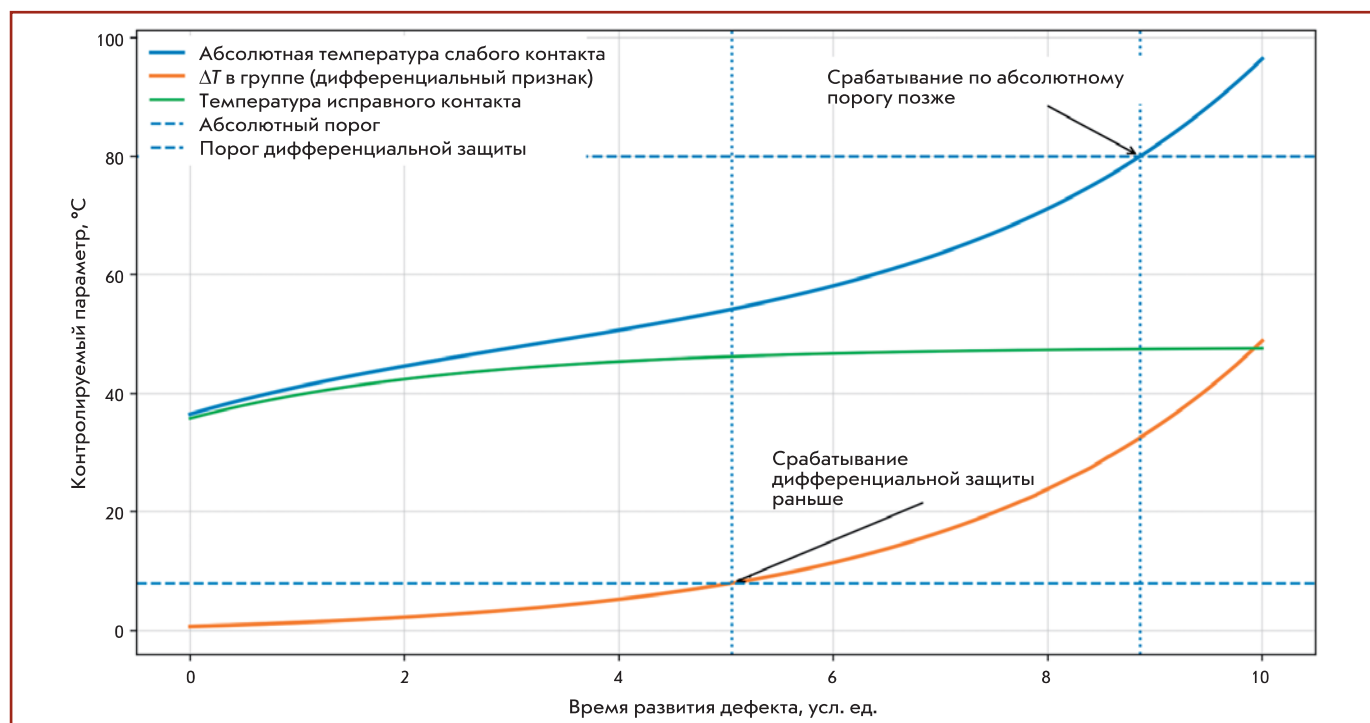


Рис. 2. Иллюстративная схема обнаружения дефекта контактного соединения

пературы (производной по времени) в момент диагностики определяют следующим образом:

$$t_{\text{диф}} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{dT_{\text{уст}}}{\delta_0} \right), \quad (8)$$

где $dT_{\text{уст}}$ — уставка относительного перегрева группы, °C.

Поскольку в дифференциальной защите общий тепловой фон $\theta(t)$ уже исключён, уставка $dT_{\text{уст}}$ обычно может быть выбрана более чувствительной, чем уставка предельно допустимой температуры эксплуатации контакта. Следовательно, $t_{\text{диф}} < t_{\text{абс}}$.

Ключевое преимущество: дифференциальная тепловая защита — это не просто «ещё один температурный алгоритм», а качественный, понятный и простой способ выявления дефекта до его критического перегрева и предоставления времени службам эксплуатации спланировать и провести обслуживание дефектного узла.

Важный вывод

Применение систем термодиагностики с контролем абсолютного порога температуры позволяет ответить только на вопрос «узел уже опасно горячий?», а дифференциальной тепловой защиты отвечает на вопрос «какой узел начал деградировать и где возможно развитие аварии?». Для реальной эксплуатации второй вопрос имеет более важное значение, потому что именно он позволяет перейти от реагирования на последствия к предупреждению повреждения оборудования.

Что получает эксплуатация в решениях НПП «Микропроцессорные технологии»

В типовой автономной архитектуре комплекса термомониторинга «Мелисса» предусматривается локальный мониторинг через панель оператора (HMI) и локальную сигнализацию. Панель оператора позволяет отслеживать перегрев каждого участка на объекте без необходимости разворачивать отдельное автоматизированное рабочее место. В основном решение с базовой станцией «Мелисса» ориентировано на сегмент потребителей электроэнергии, работающих в классе напряжения 0,4 кВ или на РУ 6 – 35 кВ, в которых применяются терминалы РЗА других производителей.

В архитектуре терминалов РЗА возможности становятся ещё интереснее: «Лютик-Плюс» и «Алтей-01» поддерживают до 12 датчиков «Мелисса». Датчики объединяются в группы по месту установки и ведётся журнал перегрева контактных соединений с фиксацией даты, времени, уровня радиосигнала, реализуются алгоритмы максимальной температуры и тепловой дифференциальной защиты, оценивается длительность событий во времени [7, 8].

Применяя устройства РЗА «Лютик-Плюс» или «Алтей-01», служба эксплуатации получает важный прикладной эффект — исключая из проекта базовые станции «Мелисса» и аппаратуру вторичной коммутации, бюджет внедрения системы термодиагностики оптимизируется.

На данный момент «Лютик-Плюс» и «Алтей-01» единственные терминалы РЗА на рынке, имеющие модуль радиосвязи для прямого соединения с термодатчиками, которые могут быть установлены в защищаемых терминалах РЗА установках. Дополнительно открывается перспектива совершенствования термомониторинга путём учёта токов первичного оборудования в моделях тепловой защиты. На данный момент это очевидный путь дальнейшего совершенствования системы, открывающий интегральные подходы к учёту термодинамических процессов контактных соединений.

Для того, чтобы службам эксплуатации было максимально удобно и оперативно считывать данные термомониторинга, производитель предоставляет мобильное приложение

KIWI-Mobile — инструмент для удобного просмотра текущих параметров и журналов, быстром доступе к документации и технической поддержке [5 – 7].

Данные термомониторинга с устройств РЗА можно транслировать и на верхний уровень, так как они поддерживают необходимые интерфейсы связи и современные протоколы обмена информацией.

Почему KIWI-Mobile дополняет инструменты мониторинга?

Панель оператора или автоматизированное рабочее место предоставляет отличный общий обзор оборудования по подстанции. Но в ежедневной эксплуатации мобильное приложение быстрее доводит специалиста до сути без необходимости коммуникации с информацией, транслированной на верхний уровень: какой именно контакт перегревается, в какой группе контактов возникло тепловое расхождение, и как развивалось событие по журналу событий, считанного напрямую с устройства.

В случае срабатывания предупредительной сигнализации по температуре на терминале РЗА в ячейке — можно быстро определить все параметры ситуации с помощью мобильного приложения на месте.

Почему термодиагностика — новый тренд развития РЗА 6 – 35 кВ?

Важно отметить растущий постоянный спрос со стороны служб эксплуатации на такие предлагаемые системы и регулярное изменение корпоративных стандартов организаций заказчиков в части введения требований и рекомендаций использования непрерывной термодиагностики. Всё большее число инженеров осознают полезность подобных решений.

НПП «Микропроцессорные технологии» разработало решения несколько лет назад в условиях отсутствия каких-либо рекомендаций для таких систем от крупных корпоративных заказчиков, и даже несмотря на отсутствие нормативной базы — решения оказались востребованы. Ответственный технический руководитель всегда осознаёт пользу термодиагностики.

На практике также встречались и показательные случаи скептического отношения к системам термодиагностики. Недавно, одному из главных энергетиков крупного промышленного предприятия в рамках ретрофита была предложена такая система, на что последовал категорический отказ: «У меня в жизни ни разу не было таких проблем с перегревом». Ситуация приняла другой оборот спустя три недели после замены выключателей на этом объекте — произошла серьёзная авария в ячейке 10 кВ, вызванная плохим контактным соединением выключателя. Этот случай наглядно продемонстрировал актуальность мониторинга контактных соединений. В результате чего мнение заказчика о целесообразности внедрения систем термодиагностики поменялось, и были осуществлены поставки системы «Мелисса» на несколько подстанций его предприятия.

Другой историей, которая подтвердила высокую эффективность термодиагностики стал проект на одном из крупнейших промышленных объектов России, в части интеграции системы «Мелисса» с панелью оператора в РУ-0,4 кВ.

Поэтапное внедрение позволило оценить работу системы в реальных условиях. На первой секции шин датчики были смонтированы и настроены, секция введена в работу. В течение 15 минут система выявила три точки локального перегрева, включая критичную зону на шинном мосте — потенциаль-

но опасный участок с высокой токовой нагрузкой. После ввода второй секции шин с термодатчиками — так же была выявлена одна точка локального перегрева. В такие моменты мы понимаем, что сделали очень полезную работу.

На одной из подстанций сетевого предприятия произошло дуговое замыкание. Наше предприятие получило ценные практические данные «моментальных» всплесков температуры в процессе появления значительных частичных разрядов, предшествовавших возникновению дугового замыкания. В результате появилось целое направление — интеграция в терминалы РЗА датчиков термодиагностики, что открывает путь не только к совершенствованию термомониторинга с учётом тока присоединения, но и к созданию простых алгоритмов выявления процессов, предшествующих повреждению изоляции в ячейках 6 – 35 кВ. Безусловно такие «кейсы» мотивируют развивать и далее подобные продукты.

Опыт китайских компаний показывает, что отрасль системно идёт к онлайн-наблюдению «24 × 7» за состоянием контактных соединений посредством мониторинга температуры, к обязательному учёту тепловых характеристик и к повышению доли непрерывной диагностики в ежедневной эксплуатации [2, 4].

Накопленный опыт компании НПП «Микропроцессорные технологии» подтверждает, что для этого уже накоплена технологическая база: стабильный протокол беспроводной связи, значительный опыт эксплуатации описанных решений, надёжные датчики, не требующие внешнего питания, алгоритмы абсолютного перегрева и тепловая дифференциальная защита, журналирование, локальная индикация, верхний уровень и мобильный доступ [5, 10].

Термодиагностика в ячейках 6 – 35 кВ — это уже не просто опция и не «приятное дополнение», но и новый уровень наблюдаемости состояния оборудования, а дифференциальная

защита — это инструмент раннего обнаружения деградации контакта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шпиганович А. Н., Мамонтов А. Н. Тепловизионный контроль разъединителей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 3. С. 74 – 78.
2. Применение технологии онлайн-диагностики состояния распределительного оборудования на основе интеллектуального агента. URL: <https://epjournal.csee.org.cn>.
3. Анализ нагрева жестких трубчатых шин линий электропередачи. URL: <https://epjournal.csee.org.cn>.
4. Типовые проблемы качества распределительного коммутационного оборудования при допуске в сеть и предложения по улучшению. URL: <https://epjournal.csee.org.cn>.
5. Алтей-01: официальная страница продукта. URL: <https://i-mt.net/altey01/>.
6. Лютик-Плюс: официальная страница продукта. URL: <https://i-mt.net/lutik-plus/>.
7. Алтей-01: руководство по эксплуатации. URL: <https://i-mt.net/wp-content/uploads/2022/12/Rukovodstvo-po-ekspluatatsii-Altej-01.pdf>.
8. Лютик-Плюс: руководство по эксплуатации. URL: <https://i-mt.net/wp-content/uploads/2025/02/Rukovodstvo-po-ekspluatatsii-Lyutik-Plyus.pdf>.
9. Мелисса: типовое решение с панелью оператора. URL: <https://i-mt.net/wp-content/uploads/2022/12/Tipovoe-reshe-nie-Melissa.pdf>.
10. KIW-Mонитор: руководство оператора. URL: <https://i-mt.net/support/documentation/id410/>.

**ПИРОГОВ М. Г., генеральный директор
ООО НПП «Микропроцессорные технологии»
г. Новосибирск
mt@i-mt.net
<https://i-mt.net>**

Вышли в свет в 2025 году следующие выпуски журнала «Библиотечка электротехника» — приложения к журналу «Энергетик»

- № 1. Папков Б. В., Илюшин П. В., Куликов А. Л. **Элементы теории живучести в системах электроэнергетики**
- № 2 – 3. **SMART GRID: интеллектуальные сети — технология и применение.** Часть 2. Технологии измерений, управления и автоматизация. Под ред. Г. Б. Лазарева, А. Н. Новаковского; общ. редакция доктора техн. наук, проф. В. Э. Воротницкого
- № 4. Овсянников А. Г., Арбузов Р. С., Жарич Д. С., Швеиц Н. А. **Ультрафиолетовый контроль высоковольтного оборудования**
- № 5. Кувшинов А. А., Вахнина В. В., Хренников А. Ю. **Защита силовых трансформаторов от токов геомагнитной индукции (по материалам СИГРЭ-2024).** Часть 1
- № 6. Куликов А. Л., Осокин В. Ю. **Методы определения места повреждения ЛЭП при замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью**
- № 7 – 8. **SMART GRID: интеллектуальные сети — технология и применение.** Часть 3. Силовая электроника и хранение энергии. Под ред. Г. Б. Лазарева, А. Н. Новаковского; общая ред. доктора техн. наук, проф. В. Э. Воротницкого
- № 9. Кувшинов А. А., Вахнина В. В., Хренников А. Ю. **Защита силовых трансформаторов от токов геомагнитной индукции (по материалам СИГРЭ-2024).** Часть 2
- № 10. Дудченко Л. Н. **Управление частотой и активной мощностью агрегатами гидроэлектростанций.** Часть 1
- № 11. Куликов А. Л., Пелевин П. С. **Автоматическое повторное включение высоковольтных кабельно-воздушных линий электропередачи.** Часть 1
- № 12. Куликов А. Л., Пелевин П. С. **Автоматическое повторное включение высоковольтных кабельно-воздушных линий электропередачи.** Часть 2