

DOI: 10.18721/JEST.230116

УДК 621.3.066.6

В.В. Титков, А.Б. Бекбаев, Е.А. Сарсенбаев

О ВОЗМОЖНОСТЯХ МОНИТОРИНГА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТАКТАХ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Анализируются возможности регистрации температуры на контактной поверхности шинного соединения. Предложен алгоритм определения максимальной температуры на контактной поверхности. Метод основан на динамическом измерении температуры на внешней поверхности контактной пары в процессе отключения тока короткого замыкания или при пуске асинхронного двигателя. Сформулированы требования к динамическому температурному датчику для типичных событий длительностью 0,1–1 с. Рассмотрены различные пути реализации «умного» датчика температуры с термистором. Датчик на основе кондуктивного способа вывода сигнала плохо применим в высоковольтных установках, поскольку из-за достаточно толстого изоляционного слоя между термистором и поверхностью шины время реакции датчика составляет порядка 10 с. Оптический канал передачи сигнала позволяет использовать тонкие изоляционные слои, которые обеспечивают время реакции датчика 1 мс. Рассмотрен пример конструкции датчика с питанием от наведенного напряжения шины и промышленно выпускаемой оптической развязкой.

ШИННЫЙ КОНТАКТ; НАГРЕВ; ТЕМПЕРАТУРА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ; МОНИТОРИНГ; ПЕРЕХОДНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ; ТЕМПЕРАТУРА НЕДОСТУПНОЙ ПОВЕРХНОСТИ; ДИНАМИЧЕСКИЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕНСОР; ДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ; ДАТЧИК ДЛЯ ШИН ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ.

Ссылка при цитировании:

В.В. Титков, А.Б. Бекбаев, Е.А. Сарсенбаев. О возможностях мониторинга нестационарных тепловых процессов в контактах силовых электроустановок // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 168–178. DOI: 10.18721/JEST.230116

V.V. Titkov, A.B. Bekbaev, E.A. Sarsenbaev

SOME POSSIBILITIES OF MONITORING TRANSIENT THERMAL PROCESSES IN CONTACTS OF ELECTRICAL POWER SETUPS

The paper analyzes the possibilities of registering temperature on the contact surface of a bus bar connection is analyzed. The algorithm for determining the maximal value of temperature on contact surface is proposed. The method is based on dynamic measurement of external surface of contact pair by disconnecting the short-circuit current or by nonsynchronous motor starting. The requirements for the dynamic temperature sensor for typical events with a duration of 0.1–1 s are determined. The different ways of realization of the smart dynamic temperature sensor for high voltage electric power setups are discussed. Two types of designs of the sensor with a thermistor are considered. The sensor based on conductive signal transmission is badly applicable for high voltage setups because it has quite a thick insulation layer between the bus surface and the thermistor, therefore it has a reaction time about 10 s and is not suited for dynamic measurements. The optical channel for signal transmission allows to use thinner insulation layers that provide a 1 ms time reaction sensor. The sample of the sensor design with power supply from the busbar-induced voltage and industrial optical insulator is proposed.

BUS BAR CONTACT; HEATING; TEMPERATURE OF CONTACT SURFACE MONITORING; TRANSIENT HEATING PROCESSES; TEMPERATURE OF INACCESSIBLE BUS BAR CONTACT SURFACE ; DYNAMIC TEMPERATURE SENSOR; DYNAMIC BUS BAR TEMPERATURE MONITRING; SENSOR FOR HIGH VOLTAGE BUS BAR

Citation:

V.V. Titkov, A.B. Bekbaev, E.A. Sarsenbaev, Some possibilities of monitoring transient thermal processes in contacts of electrical power setups, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (1) (2017) 168–178, DOI: 10.18721/JEST.230116

Введение

Одной из важнейших составных частей энергетической стратегии России [1] является развитие интеллектуальной энергетики.

Перспективы интеллектуальной энергетики связаны не только с созданием новых систем управления электрическими сетями и установками потребителей (smart grid), но и с разработкой интеллектуальных систем диагностики и мониторинга электрооборудования, например мониторинговых приборов для ограничителей перенапряжений [2, 3]. В отличие от низковольтного электрооборудования, создание цифровых систем интеллектуального управления и диагностики для силовых установок высокого напряжения связано с решением задач обеспечения электромагнитной совместимости средств измерения и преобразования сигналов, цифровых устройств, контроллеров и т. п.

Отметим также, что техническая диагностика оборудования высокого напряжения, находящегося в рабочем режиме, осуществляется при отсутствии непосредственного доступа к диагностируемому объекту. Характерный пример — широко распространенная тепловизионная диагностика контактных соединений [4, 5], которая дает лишь косвенное представление о состоянии контакта, в то время как непосредственная оценка состояния переходного контактного слоя остается невозможной. Высокая теплопроводность материала силовых ошинок (медь, алюминий) в еще большей степени усложняет диагностику, делая картину теплового поля вблизи контактного соединения малоконтрастной вследствие его заметного «расплывания». Поэтому развитие методов диагностики контактных соединений силового электрооборудования — актуальная проблема.

Одна из возможностей улучшения качества диагностики контакта — регистрация динамических тепловых режимов, в частности возникающих при коротких замыканиях, отключаемых в течение десятых долей секунды, или пусках электродвигателей [6–8]. При этом мгновенные значения температуры в области ло-

кального повышения резистивности шины (контакт, отверстия) могут быть значительно выше усредненных значений. Это обстоятельство весьма существенно для плоских контактных соединений, изменяющих свое состояние под воздействием механического, климатического и длительного термического факторов, приводящих к росту переходного сопротивления контакта. Поскольку толщина токоведущих шин достигает десятков миллиметров, а толщина слоя с повышенным уровнем тепловыделения вблизи контактной поверхности составляет весьма малые доли миллиметра, то прямые измерения на поверхности шины не позволяют зафиксировать истинное значение температуры непосредственно в зоне контакта.

Несмотря на отмеченное отсутствие прямого доступа к контактным поверхностям соединяемых шин, анализ поля температуры в зоне плоского контакта позволяет установить функциональную связь температур в контактной зоне и на поверхности шины, а также связь фиксируемой на поверхности шины температуры с физическими характеристиками качества контакта (переходным сопротивлением).

Цель и задачи работы

Исходя из выше сказанного можно заключить, что создание интеллектуального датчика температуры контактного соединения связано как с созданием алгоритмов обработки записываемых сигналов с целью определения температуры недоступной контактной поверхности, так и с выбором и компоновкой элементов необходимой аппаратной части, обеспечивающей регистрацию температуры в переходном режиме с разрешением по времени не хуже 1 мс и условия электромагнитной совместимости. Эти аспекты проблемы рассматриваются в настоящей работе.

Импульсные токи в шинах для отмеченных режимов в мощных устройствах могут достигать десятков килоампер. При этом получение зависимости температуры от времени с помощью контактных датчиков температуры [9], распола-

гаемых на поверхности шины в области контакта, требует применения конструктивных и схемных решений, обеспечивающих отсутствие или компенсацию электромагнитных помех. В частности, для шины сечением 50×5 мм² при токе 10 кА магнитное поле на поверхности шины будет порядка 0,1 Тл. При характерном размере пленочного платинового датчика 10 мм навводимое в его цепи на промышленной частоте напряжение составит несколько милливольт. Это позволяет рассчитывать на относительно небольшую погрешность измерений при использовании напряжений возбуждения терморезистора датчика порядка нескольких вольт. Для практической реализации описанной выше идеи в первую очередь необходимо обосновать принципиальную возможность оценки температуры непосредственно контактного соединения по данным измерения на доступной поверхности шины. Второй задачей работы является выбор и компоновка элементов измерительного устройства, удовлетворяющего отмеченным выше требованиям.

Методика решения задачи

Приводимые ниже результаты анализа проблемы и алгоритмы распознавания температуры на недоступной поверхности контактной пары основаны главным образом на применении теории теплопередачи; она предлагает целый ряд полезных аналитических результатов, применимых для описания процессов нагрева контактов в упрощенной постановке. В то же время справедливость применяемых упрощений должна быть подтверждена анализом более полной постановки задач, который в настоящее время может быть успешно выполнен с помощью стандартных программных средств, реализующих метод конечных элементов. Поэтому в качестве методической базы, применяемой в данной работе, служат численные и аналитические методы решения уравнения нестационарной теплопроводности при наличии импульсного джоулевого нагрева в электропроводящей среде (токоведущая ошиновка)

Как хорошо известно [10], поле температуры в твердом теле с источниками нагрева описывается уравнением теплопроводности относительно температуры T :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \dot{q},$$

где ρ , c , λ — плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность; t — время, \dot{q} — объемная плотность мощности распределенного источника тепла. В случае анализа тепловыделения в токоведущих элементах установок выражение для объемного источника имеет вид

$$\dot{q} = j^2 / \sigma, \quad (1)$$

где \vec{j} — вектор плотности тока; σ — электропроводность. Характерное время распространения теплового поля на глубину l оценивается параметром

$$t_D = \frac{l^2}{D}$$

где $D = \frac{\lambda}{\rho c}$. В частности, если характерные размеры в плоскости контактного соединения составляют несколько сантиметров, то в случае медной ошиновки ($\lambda = 400$ Вт/м К, $\rho = 8960$ кг/м³, $c = 380$ Дж/кг К) t_D составляет несколько секунд. Поэтому для динамической оценки температуры при воздействии импульсов тока в течение интервала времени до 1000 мс можно пренебрегать распространением температурного поля из зоны контакта вдоль шины (рис. 1). Таким образом, анализ температурного поля в направлении, перпендикулярном плоскости шин, при указанном ограничении временного интервала можно выполнять с помощью одномерного уравнения теплопроводности, которое при постоянных теплофизических характеристиках материала шин имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{q}. \quad (2)$$

Решение данного уравнения позволяет установить связь температуры в плоскости контакта ($x = 0$) и в точке измерения температуры ($x = l$, рис. 1).



Рис.1. Распределение плотности тока в области контакта (а) и температуры (б) в момент времени 100 мс

Рассмотрим распределение источника тепловыделения. В основном сечении контактирующих шин примем однородное распределение плотности тока j и объемной мощности тепловыделения (1). При всем разнообразии физических и механических процессов, происходящих на контактной поверхности [11, 12], повышенное тепловыделение имеет место в тонком переходном слое контакта толщиной Δ ($\Delta \ll l$), который обладает электропроводностью σ_1 , меньшей, чем у материала шины, $\sigma_1 < \sigma$. Объемная плотность мощности тепловыделения в переходном слое также определяется с помощью формулы (1). Однако, поскольку толщина слоя на несколько порядков меньше толщины шины l , то удобнее учесть тепловыделение в слое в виде теплового потока на границе контакта ($x = 0$):

$$\Phi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{1}{2} j^2 \left(\frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma} \right) \Delta. \quad (3)$$

Множитель $\frac{1}{2}$ в последней формуле учитывает, что тепловыделение в переходном слое равными частями распределяется между контактирующими шинами.

Для дальнейшего анализа целесообразно уравнения и соотношения (1)–(3) записать в безразмерных переменных: θ — температура, ξ — координата, τ — время. Если описать импульс тока, протекающего через контакт, с помощью действующего значения плотности тока j_0 и длительности импульса T_p , то, выбрав в качестве набора базисных величин длину l , время

l^2/D , температуру $\frac{j_0^2 T_p}{\sigma \rho c}$, задачу можно привести к виду

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{f(\tau)}{\tau_p};$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = -\frac{f(\tau)}{\tau_p} \Pi; \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{\Delta}{2l} \left(\frac{\sigma}{\sigma_1} - 1 \right),$$

где $f(\tau)$ и τ_p — функция формы и безразмерная длительность импульса тока. Параметр Π фактически характеризует качество контакта, т. к. определяется толщиной и электропроводностью переходного слоя. Несмотря на то, что реальные формы импульсов тока чаще всего имеют колебательную форму [6–8], благодаря их относительно небольшой длительности (от долей секунд при коротких замыканиях до единиц секунд при пусковых токах) тепловыделение может быть представлено энергетически эквивалентным прямоугольным импульсом аналогичной длительности. Примеры численного решения системы (4), полученные для импульса тока прямоугольной формы,

$$f(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{при } \tau < \tau_p; \\ 0, & \text{при } \tau \geq \tau_p, \end{cases}$$

приведены на рис. 2.

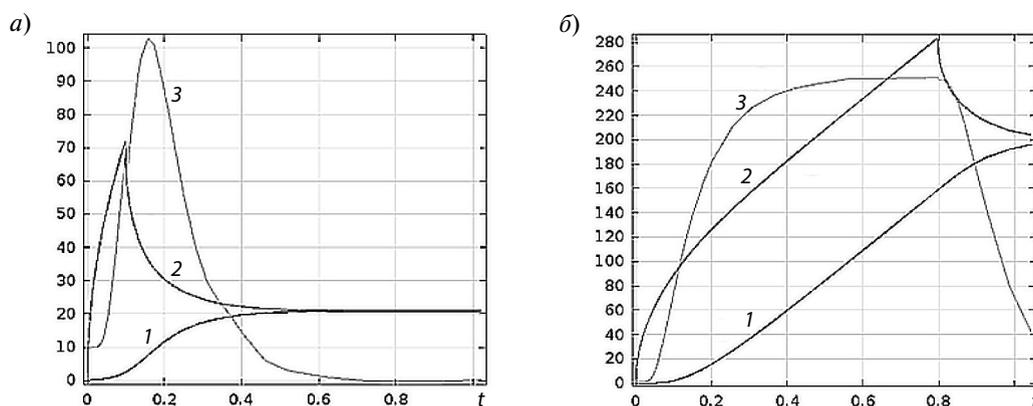


Рис. 2. Расчетные безразмерные зависимости от времени температуры на поверхности шины (1), температуры в точке контакта (2), скорости изменения температуры на поверхности шины (3):
 а — $\tau_p = 0,1$; $\Pi = 20$; б — $\tau_p = 0,1$; $\Pi = 200$

Более благоприятные условия решения задачи определения температуры недоступной поверхности возникают в случае сравнительно длинных импульсов тока ($\tau_p \gg 1$), имеющих место при отключении короткого замыкания или пуске асинхронных двигателей. В этом случае индикация окончания активной фазы по ходу зависимости dT/dt легко осуществляется по моменту начала спада этой зависимости (см. рис. 2). При существенном снижении качества контакта главным источником нагрева становится его переходное сопротивление. При этом для описанного режима решение задачи определения температуры недоступной поверхности может быть выполнено на основе аналитического решения для нестационарного теплового поля в пластине, создаваемого плоским источником на одной из ее сторон. В этом случае целесообразно использовать безразмерный вид уравнения теплопроводности, предложенный в работе [13]. Согласно [13] выбираются следующие базисные значения: температура $T_b = \Phi_0 l / \lambda$, где Φ_0 — постоянное значение потока на поверхности $x = 0$; время $t_b = l^2 / D$. Тогда безразмерные превышения температуры на поверхностях пластины над начальным значением $T_0 - \theta = (T - T_0) / T_b$ выражаются зависимостями [13]

$$\theta(0) = \tau + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\pi^2 2n^2 \tau}}{n^2}; \quad (6)$$

$$\theta(l) = \tau - \frac{1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\pi^2 n^2 \tau}}{n^2} (-1)^n.$$

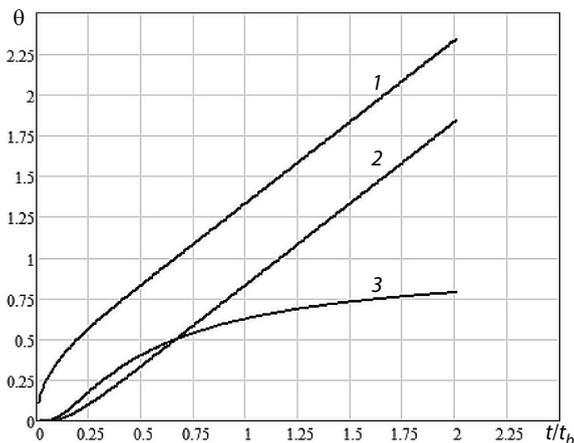


Рис. 3. Безразмерные временные зависимости температуры контакта (1) и поверхности шины (2) и калибровочной кривой $f_\theta(\tau)$ (3)

На рис. 3 представлены рассчитанные на основе формул (6) зависимости безразмерных температур на контактной поверхности $\theta(0, \tau)$ и поверхности шины $\theta(1, \tau)$, а также зависимость

$$f_\theta(\tau) = \frac{\theta(1, \tau)}{\theta(0, \tau)} = \frac{T_1(t/t_b)}{T_0(t/t_b)},$$

которая позволяет выразить температуру $T_0(t)$ на контактной поверхности через измеряемую температуру $T_1(t)$ на внешней поверхности шины:

$$T_0(t/t_b) - T_0 = (T_1(t/t_b) - T_0) f_\theta^{-1}(t/t_b). \quad (7)$$

Универсальная калибровочная функция $f_\theta(\tau)$ может храниться в памяти управляющего датчиком контроллера в виде последовательности или аналитической аппроксимации. Например, в области $2 > \tau > 0,1$ можно использовать зависимость вида

$$f_\theta(\tau) \cong 0,1082\tau^3 - 0,5858\tau^2 + 1,159\tau - 0,05514.$$

Таким образом, температура контактной поверхности может быть рассчитана по температуре $T_1(t)$ поверхности шины согласно выражению

$$T_0(t/t_b) = T_0(0) + (T_1(t/t_b) - T_0(0)) \times \left[0,1082 \left(\frac{t}{t_b} \right)^3 - 0,5858 \left(\frac{t}{t_b} \right)^2 + 1,159 \left(\frac{t}{t_b} \right) - 0,05514 \right]^{-1}.$$

Значение базисного времени $t_b = l^2 / D$, определяемое толщиной шины l и температуропроводностью ее материала D , может быть внесено в программу микроконтроллера, осуществляющего вычисление температуры по последнему выражению. Это обстоятельство обуславливает индивидуальную настройку измерительного устройства для каждого контролируемого контакта. Однако толщины и материалы шин в силовом оборудовании не претерпевают каких-либо существенных вариаций. В частности, материалами, как правило, являются медь или

алюминий, а толщина шины находится в интервале 5–20 мм. Поэтому индивидуальная настройка контролера управления датчиком не создает существенной проблемы.

Формула (7), задействованная в алгоритме обработки измеряемой зависимости температуры на поверхности шины, очевидно, применима только на стадии роста температуры контактной поверхности. Поэтому получаемые с помощью (7) значения имеют смысл вплоть до наибольшего из элементов вычисленной последовательности значений. Дальнейшее поведение анализируемых зависимостей уже не может быть описано формулами Бека (6). Таким образом, представленный алгоритм позволяет оценить максимальное значение температуры, достигаемой контактной поверхностью.

На рис. 4, 5 приведен пример работы описанного выше алгоритма, основанного на формулах Бека (6), применительно к плоскому контакту медных шин толщиной 5 мм в процессе отключения тока короткого замыкания при проводимости переходного слоя контакта равной 0,1 % от проводимости основного материала. (рис. 4, 5).

Следует обратить внимание на то, что, несмотря на отличие реальных условий, характеризующих пульсирующим с удвоенной промышленной частотой характером тепловыделения, от модели Бека, где предполагается постоянное во времени тепловыделение, восстановленные значения температуры контактной поверхности хорошо согласуются с расчетными.

Экспериментально-аналитическая часть

Рассмотрим далее возможности создания интеллектуального сенсора, реализующего описанный выше принцип. Наличие контактных датчиков температуры, обладающих достаточным (не хуже 0,001 с) временным разрешением, позволяет эффективно решать задачи тепловой диагностики контактных соединений в ошиновках распределительных устройств высокого напряжения. Способность датчика измерять временные зависимости температуры поверхности шин на интервалах 0,1–1 с позволяет диагностировать состояние контактных соединений в процессе отключения токов короткого замыкания или при пусках электродвигателей [1]. В данной части работы рассматриваются проблемы аппа-

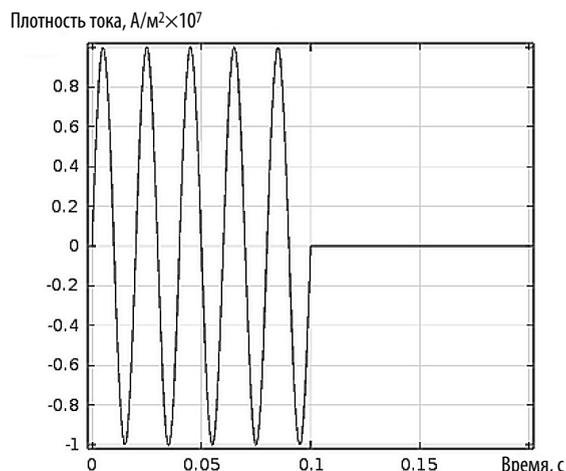


Рис. 4. Зависимость плотности тока в площади контакта при отключении тока короткого замыкания

ратной реализации динамических измерений температуры, включая доставку аналогового сигнала к АЦП.

В качестве чувствительного элемента могут использоваться термопары или терморезисторы. Термопары, обладая достаточной точностью, при своей дешевизне и надежности имеют и ряд существенных недостатков: нелинейность характеристики; необходимость контролировать температуру холодного спая и низкий уровень полезного сигнала, составляющий для интересующего здесь температурного диапазона 30–500 °С величину порядка единиц мВ [15].

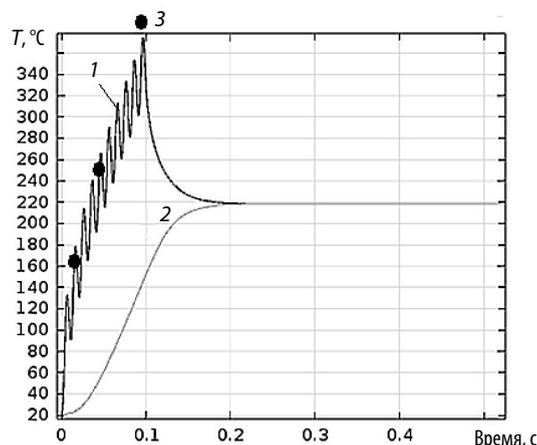


Рис. 5. Расчетные зависимости температуры от времени: на контактной поверхности — 1; на поверхности шины — 2; восстановленные по формуле (7) значения температуры контакта — 3

Применение гальванического тракта для передачи сигнала термочувствительного элемента сопряжено с проблемой обеспечения электрической прочности: в случае измерения температуры на ошиновках высоковольтных устройств требуется применение изоляционных элементов достаточной толщины, которые становятся причиной снижения динамических характеристик сенсора. На рис. 6 показан пример возможного дизайна температурного сенсора с гальваническим выводом, способного работать в условиях высокого электрического потенциала поверхности, температура которой измеряется. Пленочный терморезистор *1* располагается внутри керамического изоляционного корпуса, имеющего вид пустотелого цилиндра *4*. Нижнее (контактное) основание керамического корпуса имеет весьма малую толщину, чтобы обеспечить максимально возможную теплопроводящую способность стенки. Основание корпуса усилено механически тонкостенным медным цилиндром, обеспечивающим высокую теплопроводность от токопроводящей шины к контактному основанию керамического корпуса. Внутренняя поверхность изоляционного корпуса покрыта слоем проводника *3*, гальванически связанного с экраном отводящего сигнал кабеля *5*. Экран на приемном конце соединен с общей точкой заземления установки. Поэтому расположенный внутри корпуса чувствительный элемент — пленочный терморезистор *1* — находится внутри области

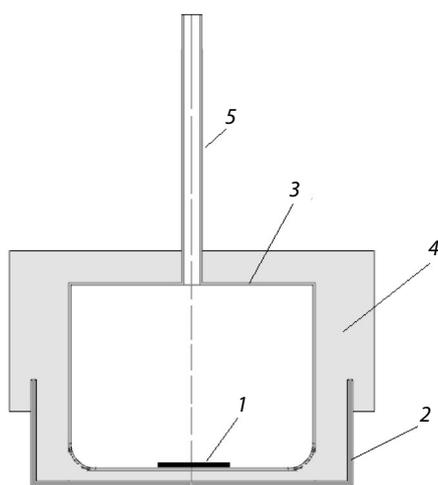


Рис. 6. Дизайн датчика температуры с гальваническим выводом сигнала

с нулевыми значениями электрического потенциала и напряженности поля, т. е. полностью защищен от воздействия высокого напряжения. Область сильного электрического поля при этом имеет место между проводящими стенками *3* и *2* в нижней керамической стенке нижнего основания корпуса.

Поэтому толщина этой стенки ограничена электрической прочностью применяемого изоляционного материала. Из всех употребительных изоляционных материалов электрокерамика обладает весьма высокой теплопроводностью порядка 1–2 Вт/м К. В то же время керамические материалы имеют высокую электрическую прочность, достигающую 50 кВ/мм [16]. Поэтому данные материалы, в частности электрофарфор, предпочтительнее других видов твердой изоляции. Так, при толщине основания диэлектрического корпуса 1 мм максимальная напряженность электрического поля составляет 38 кВ/мм, что не превосходит электрическую прочность электрокерамики. Дальнейшее уменьшение толщины диэлектрического основания нецелесообразно, так как это может вызвать электрический пробой стенки основания датчика, например при появлении перенапряжений на шинах распределительного устройства. Это в свою очередь приведет к однофазному короткому замыканию, выходу из строя измерительных цепей системы мониторинга температуры и отключению установки устройствами релейной защиты.

Для расчетной оценки динамических характеристик рассмотренного датчика зададимся линейным законом изменения температуры на поверхности шины (рис. 7) с характерным временем нарастания 0,4 с. Рис. 7, в частности, показывает заметные искажения измеренной температурной зависимости по сравнению с действительной. Можно видеть как существенные искажения формы кривой, так и погрешность измерения максимального значения порядка 20–30 %.

Как следует из сказанного выше, применение гальванического канала связи для вывода сигнала термочувствительного элемента сопряжено с проблемой обеспечения электрической прочности датчика, которая должна быть рассчитана на полное рабочее напряжения силовой установки. В случае установок с напряжением

35 кВ и выше это приводит к необходимости использовать диэлектрические покрытия, толщина которых является причиной заметных искажений измеряемой зависимости температуры.

Использование более тонких изолирующих подложек для терморезистора возможно при условии отказа от гальванической схемы вывода сигнала в пользу оптического канала. При выводе сигнала (ток терморезистора или усиленная до необходимого уровня термо-ЭДС в случае применения термопары) с помощью оптического канала необходимо разместить гальванически не связанный с измерительной цепью источник питания. В качестве такого источника может применяться миниатюрный аккумулятор, имеющий постоянную подзарядку от силовой шины с помощью индуктивной связи (рис. 8).

Из выпускаемых промышленностью оптических развязок следует выделить изделия, рассчитанные на эксплуатацию при высоких напряжениях, в частности оптоизоляторы [17].

Геометрические характеристики оптоизолятора класса 40 кВ приведены на рис. 9.

Время реакции описываемого оптоизолятора при импульсных воздействиях составляет 20 мкс [17]. Поэтому для указанных выше параметров импульсного процесса с характерными длительностями 0,1 с и выше оптоизолятор каких-либо

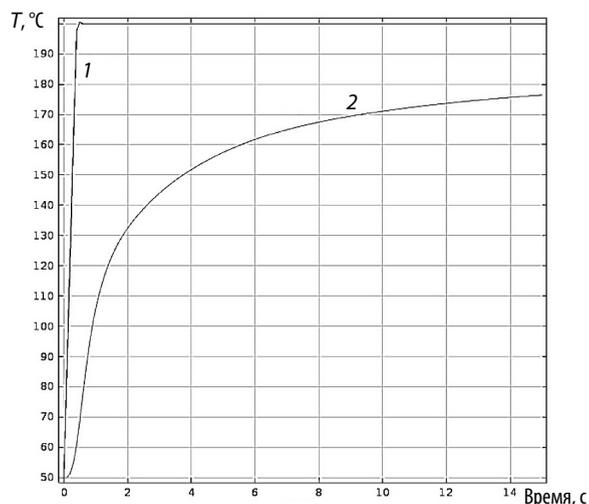


Рис. 7. Расчетные зависимости от времени температуры поверхности шины (1) и поверхности термочувствительного элемента (2)

существенных искажений в форму сигнала не вносит. Достаточная электрическая изоляция пленочного резистора может быть обеспечена применением тонкой подложки из термостойкой полимерной пленки, например марки Ф-4 с температурой термической деструкции порядка 400 °С и толщиной 0,02 мм. При этом время тепловой инерции составит величину порядка

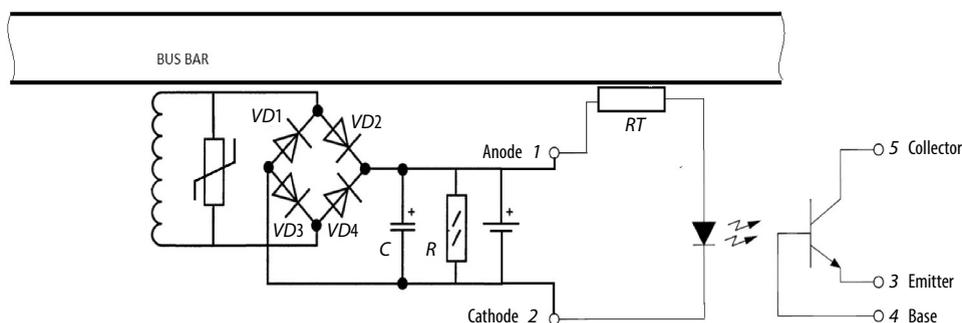


Рис. 8. Схема подключения терморезистора *RT* с питанием по индуктивной связи от тока контролируемой шины и оптической развязкой выходного сигнала с помощью пары «светодиод — фототранзистор»

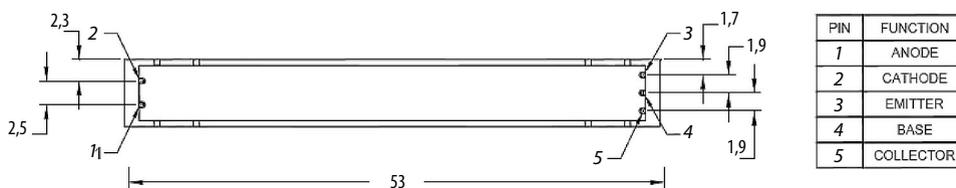


Рис. 9. Геометрические размеры и расположение выводов оптоизолятора

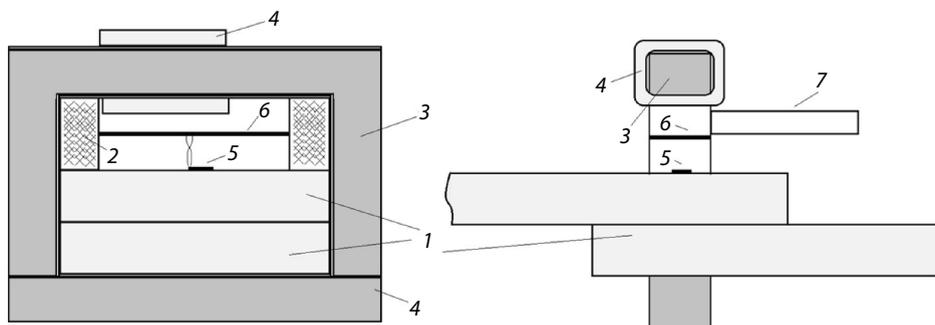


Рис. 10. Пример компоновки элементов динамического температурного сенсора на контактном соединении плоских шин

10^{-3} с, что достаточно для регистрации процессов импульсного нагрева поверхности шин с указанной выше длительностью порядка 0,1 с.

Один из примеров компоновки элементов сенсора, имеющего вывод аналогового сигнала с помощью оптической развязки приведен на рис. 10. Замкнутый магнитопровод 3 со съемным ярмом 4 монтируется на диэлектрических опорах 2 на внешней плоскости шинного контакта 1. На верхнем ярме магнитопровода размещается обмотка питания автономного выпрямителя рис. 8. В окне, образуемом диэлектрическими опорами, установлена монтажная плата 6 с элементами схемы выпрямителя и аккумулятором питания терморезистора. С монтажной платы выполнен вывод к пленочному терморезистору 5. Оптопара 7 размещается над поверхностью шины на уровне монтажной платы. Описанная конструкция обеспечивает удобный монтаж сенсора в случаях как горизонтального, так и вертикального размещения пары плоских шин.

Выводы

Температура контактной поверхности шинного соединения в силовых электроустановках при переходных режимах (отключение коротко-

го замыкания, пуски электродвигателей) может заметно превосходить температуру внешней поверхности шин, доступную для непосредственных измерений.

Разработан алгоритм определения температуры в области контактного соединения на основе измеренной зависимости от времени температуры поверхности шины в области контакта. Алгоритм отличается простотой и может быть легко реализован при обработке результатов измерений в микроконтроллере.

Применение контактных датчиков температуры с гальваническим выводом сигнала для записи температурных зависимостей от времени в случае силовых высоковольтных распределительных устройств нецелесообразно в силу их большой инерционности.

Температурный сенсор для динамической регистрации температуры поверхности шин силовых распределительных устройств с временным разрешением порядка 1 мс может быть создан на основе применения автономного источника питания, имеющего индуктивную связь с рабочим током шины, и оптической развязки для передачи аналогового сигнала (температуры)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года (ЭС-2030), утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. №1715-р.
2. <http://www.abb.ru>
3. <http://www.dimrus.ru>
4. Назарычев А.Н., Таджибаев А.И., Сухичев М.И., Титков В.В. Критерии оценки состояния контактных

- соединений при тепловизионной диагностике электрооборудования // Энергоэксперт. 2013. №2 (37). С. 58–61.
5. Сухичев М.И., Титков В.В. К вопросу о тепловой диагностике контактных соединений // Электро. 2010. №3. С. 37–39.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Т 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 532 с.

7. **ГОСТ Р 52565–2006.** Национальный стандарт Российской Федерации. Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. М.: Стандартинформ, 2007. 86 с.

8. **ГОСТ Р 52736–2007.** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. М.: Стандартинформ, 2007. 40 с.

9. **Маргелов А.** Новые платиновые датчики температуры // *Новости электроники*. 2007. №1. 8 с.

10. **Александров Г.Н., Борисов В.В., Иванов В.Л. [и др.]** Теория электрических аппаратов / Под ред. Г.Н. Александрова. М.: Высшая школа, 1985. 312 с.

11. **Ким Е.И., Омельченко В.Т., Харин С.Н.** Математические методы тепловых процессов в электрических контактах / Академия наук Казахской ССР,

Институт математики и механики. Алма-Ата: Наука, 1977. С. 230–232.

12. **Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М.** Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 558 с.

13. **Бек Дж., Блэкуэлл Б., Сент-Клер Ч.** Некорректные обратные задачи теплопроводности. М.: Мир, 1989.

14. Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией / Под ред. проф. Ю.И. Вишневого. СПб.: Энергоатомиздат, 2002. 728 с.

15. **Олейник Б.** Приборы и методы температурных измерений. М.: Издательство стандартов, 1987. 203 с.

16. **Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С.** Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1987. 367 с.

17. <http://www.micropac.com/>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТИТКОВ Василий Васильевич — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: titkovprof@yandex.ru

БЕКБАЕВ Аманкельды Бекбаевич — доктор технических наук профессор Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева. 050013, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а. E-mail: bekbaev_a@mail.ru

САРСЕНБАЕВ Ерлан Алиаскарович — ассистент Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева. 050013, Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22а. E-mail: erlansar@mail.ru

REFERENCES

1. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda (ES-2030), utverzhdena ras-poryazheniyem Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 13 noyabrya 2009 g. №1715-r.

2. <http://www.abb.ru>

3. <http://www.dimrus.ru>

4. **Nazarychev A.N., Tadzhibayev A.I., Sukhichev M.I., Titkov V.V.** Kriterii otsenki sostoyaniya kontaktnykh soyedineniy pri teplovizionnoy diagnostike elektrooborudovaniya. *Energoekspert*. 2013. №2 (37). S. 58–61. (rus.)

5. **Sukhichev M.I., Titkov V.V.** K voprosu o teplovoy diagnostike kontaktnykh soyedineniy. *Elektro*. 2010. № 3. S. 37–39. (rus.)

6. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** Elektricheskiye mashiny. T.2. М.: Izdatelskiy dom MEI, 2006ю 532 s. (rus.)

7. **ГОСТ R 52565–2006.** Natsionalnyy standart Rossiyskoy federatsii Vykluchateli pe remennogo toka na napryazheniye ot 3 do 750 kV. М.: Standartinform, 2007. 86 с. (rus.)

8. **ГОСТ R 52736–2007.** Korotkiye zamykaniya v elektroustanovkakh. Metody rascheta elektrodinamicheskogo i termicheskogo deystviya toka korotkogo zamykaniya. М.: Standartinform, 2007. 40 с. (rus.)

9. **Margelov A.** Novyye platinovyye datchiki temperatury. *Novosti elektroniki*. №1. 2007. 8s. (rus.)

10. **Aleksandrov G.N., Borisov V.V., Ivanov V.L. [i dr.]** Teoriya elektricheskikh apparatov / Pod red. G.N. Aleksandrova. М.: Vysshaya shkola, 1985. 312 s. (rus.)

11. **Kim Ye.I., Omelchenko V.T., Kharin S.N.** Matematicheskiye metody teplovykh protsessov v elektricheskikh kontaktakh; Akademiya nauk Kazakhskoy SSR, Institut matematiki i mekhaniki. — Alma-Ata: Nauka, 1977. S. 230–232.

12. **Myshkin N.K., Konchits V.V., Braunovich M.** Elektricheskiye kontakty. Dolgoprudnyy : Intellekt, 2008. 558 s.: il.

13. **Bek Dzh., Blekuell B., Sent-Kler Ch.** Nekorrektnyye obratnyye zadachi teploprovodnosti / Per. s angl. М.: Mir, 1989. 313 s. (rus.)

14. Elektricheskiye apparaty vysokogo napryazheniya selegazovoy izolyatsiyey / Pod red. prof. Yu. I. Vishnevskogo. SPb.: Energoatomizdat, 2002. 728 s. (rus.)

15. **Oleynik B.** Pribory i metody temperaturnykh izmereniy, М.: Izdatelstvo standartov, 1987. 203 s. (rus.)

16. **Kuchinskiy G.S., Kizevetter V.Ye., Pinal Yu.S.** Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya. М.: Energoatomizdat, 1987. 367 s. (rus.)

17. <http://www.micropac.com/>

AUTHORS

ТИТКОВ Василий В. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: titkovprof@yandex.ru

БЕКБАЕВ Аманкелды Б. — *Kazakh National Technical University named after K.I. Satpayev*. 22. Satpayev Str. Almaty. 050013. Kazakhstan. E-mail: bekbaev_a@mail.ru

SARSENBAEV Erlan A. — *Kazakh National Technical University named after K.I. Satpayev*. 22. Satpayev Str. Almaty. 050013. Kazakhstan. E-mail: erlansar@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 13.03.2016.