электрического тока и его проявлений. В настоящее время наиболее выгодным проводником при токах более 630 А выступают шинопроводы. В отношении токопроводов промышленного использования можно отметить, что диапазон напряжения, при котором они работают, составляет 0,22–20 кВ при токах от 100 до 6 300 А.

Различают шинопроводы с воздушной изоляцией, типа «сэндвич» с изоляцией из пленочного диэлектрика, полимерной смолы или бетона.

Яркой отличительной особенностью системы шин с воздушной изоляцией является то, что между проводниками существует определенный зазор и система шин функционирует в закрытом металлическом корпусе в частично изолированной среде, наполненной воздухом. Проводники (алюминиевые или медные) не прилегают друг к другу. По этой причине передача тепла осуществляется теплопередачей вдоль плоскости каждой отдельной шины, а также в некоторой степени посредством конвекции воздуха внутри объема корпуса шинопровода. Для поддержания стабильного расстояния между шинами и относительно корпуса (кожуха) шинопровода используют изоляторы, однако их роль в процессе теплообмена между соседними шинами чрезвычайно мала по причине малых геометрических размеров, а также низкой теплопроводности.

Для снижения габаритных размеров место шинопроводов с воздушной изоляцией занимают компактные (типа «сэндвич») шинные системы. Основная особенность компактной шинной системы заключается в том, что после того, как проводники (алюминиевые или медные) обернуты изоляционными материалами (в первую очередь полиэфирной пленкой класса В, покрытой эпоксидным или полипропиленовым изоляционным термостойким материалом), они помещаются в металлический корпус в виде сэндвича без воздушной прослойки. Поскольку расстояние между проводниками минимизировано, индуктивное сопротивление уменьшается и соответственно снижается падение напряжения. Благодаря корпусу, выполняющему функцию охлаждения данной сборки, отдача рассеиваемого тепла в окружающую среду реализуется достаточно эффективно. Однако использование пленочных изоляционных материалов уменьшает стойкость шинопроводов к воздействию аварийных режимов (в первую очередь токов короткого замыкания). Это обусловливает трудности при проведении диагностики и последующем ремонте, так как требуется замена секции шинопровода.

Наибольшее значение пропускной электрической мощности среди общепромышленных шинопроводов в настоящее время у шинопроводов с изоляцией из литой смолы или бетона (так называемого компаунда). В данном случае шины на заводе помещаются в жидкий раствор смолы или бетона, которые в процессе высыхания формируют качественный изоляционный слой, обеспечивающий защиту от воздействия окружающей

среды, так и высокие электроизоляционные свойства. Кроме того, это покрытие обладает высокой механической прочностью готового изделия и устойчивостью его как к внешним воздействиям, так и динамическим усилиям токов короткого замыкания. Однако такое исполнение шинопроводов приводит к возникновению трудностей при диагностики их состояния. Связано это в первую очередь с тем, что отдельные секции шинопровода при монтаже протяженных участков соединены между собой болтовым соединением, залитым впоследствии слоем компаунда, что затрудняет доступ к ним. Во-вторых, теплопроводность бетона или смолы значительно ниже теплопроводности металла, что ухудшает отвод тепла, а также препятствует прямой тепловизионной диагностике шинопровода [3].

Как правило, именно в соединении образуется наиболее горячая точка в системе шин с твердой изоляцией, что приводит к значительному термическому воздействию и, возможно, даже локальному разрушению изоляции. Диагностика таких внутренних повреждений трудна и затратна, поэтому часто возникает необходимость измерить температуру внутри стыка. Непосредственное измерение температуры проводника технически сложно выполнить из-за высокого напряжения, на котором работает проводник. Существующий метод оптоволоконных распределенных датчиков температуры [4] при высокой эффективности и достаточной точности локализации точек перегрева является чрезвычайно затратным для обычных шинопроводов. Установка единичных инфракрасных датчиков [5] над местами потенциального перегрева шинопроводов малоинформативна и не обеспечивает требуемый уровень надежности из-за возможного недоучета некоторых потенциальных мест разогрева, а также необходимости установки сразу нескольких датчиков в случае сложных геометрических форм шинопроводов. В результате косвенный метод выступает единственным возможным способом оперативного мониторинга температуры соединения. Поскольку температуру поверхности необходимо измерять с помощью датчика температуры указанным методом, в данной статье рассматривается только полностью изолированная шина.

На данный момент почти нет публикаций, посвященных контролю температуры полностью изолированного шинного соединения. Однако полностью изолированная шина по конструкции во многом похожа на силовой кабель, в котором в основном используется контроль температуры соединения по температуре поверхности кабеля. Но необходимо учесть, что в силу различной геометрии, а также применяемой изоляции (для ряда кабелей устанавливаются металлические экраны между слоями изоляции) неизбирательное копирование метода, используемого по отношению к кабелям, приводит к большой температурной погрешности у полностью изолированного соединения шин.

Для лучшего понимания метода контроля температуры необходимо проанализировать распределение теплового потока внутри изолированного соединения шин. Как показано в [6], из-за высокой теплопроводности проводника бóльшая часть теплового потока будет переноситься в проводнике от места соединения в обе стороны. Тем не менее из-за расположения шинопровода преимущественно в закрытых помещениях с температурой не выше 20–25 °C тепло от шин будет передаваться от разогретого проводника к более холодной поверхности. Основываясь на вышеизложенном принципе, температуру горячей точки можно оценить вдоль упомянутых выше радиальных и осевых тепловых потоков по температурам поверхности, а точнее, по градиенту изменения температуры поверхности. Первым шагом в этом случае будет расчет температуры проводника (T_1, T_2) с использованием температур поверхности (Ts_1, Ts_2) в двух разных осевых положениях вдоль радиального теплового потока. Впоследствии полученные температуры проводников (T_1, T_2) в шине можно использовать для оценки температуры горячей точки T_0 внутри соединения в осевом направлении. Первым этапом будет расчет температуры в радиальном направлении в шине, а вторым – в осевом направлении в проводнике. При этом подходе входные данные, которые необходимо измерить, содержат как минимум две температуры поверхности и ток. Поскольку нагрев шинопровода может происходить в любой из трех фазных шин, что вызвано и протеканием несимметричных аварийных режимов, и особенностями геометрии проводников, то целесообразно проводить изменение не менее чем по четырем точкам (с двух боковых сторон и сверху-снизу).

Из-за сходства кабеля и полностью изолированной шины температура проводника в абсолютно изолированном однофазном шинопроводе может быть рассчитана с помощью одномерной переходной тепловой сети по температуре поверхности. При этом для шинопровода в литой изоляции в зоне около поверхности, как правило, отсутствует воздух, что упрощает расчетную задачу, связанную с процессами конвективного теплообмена в воздушных полостях, а также необходимостью учитывать теплопроводность воздуха.

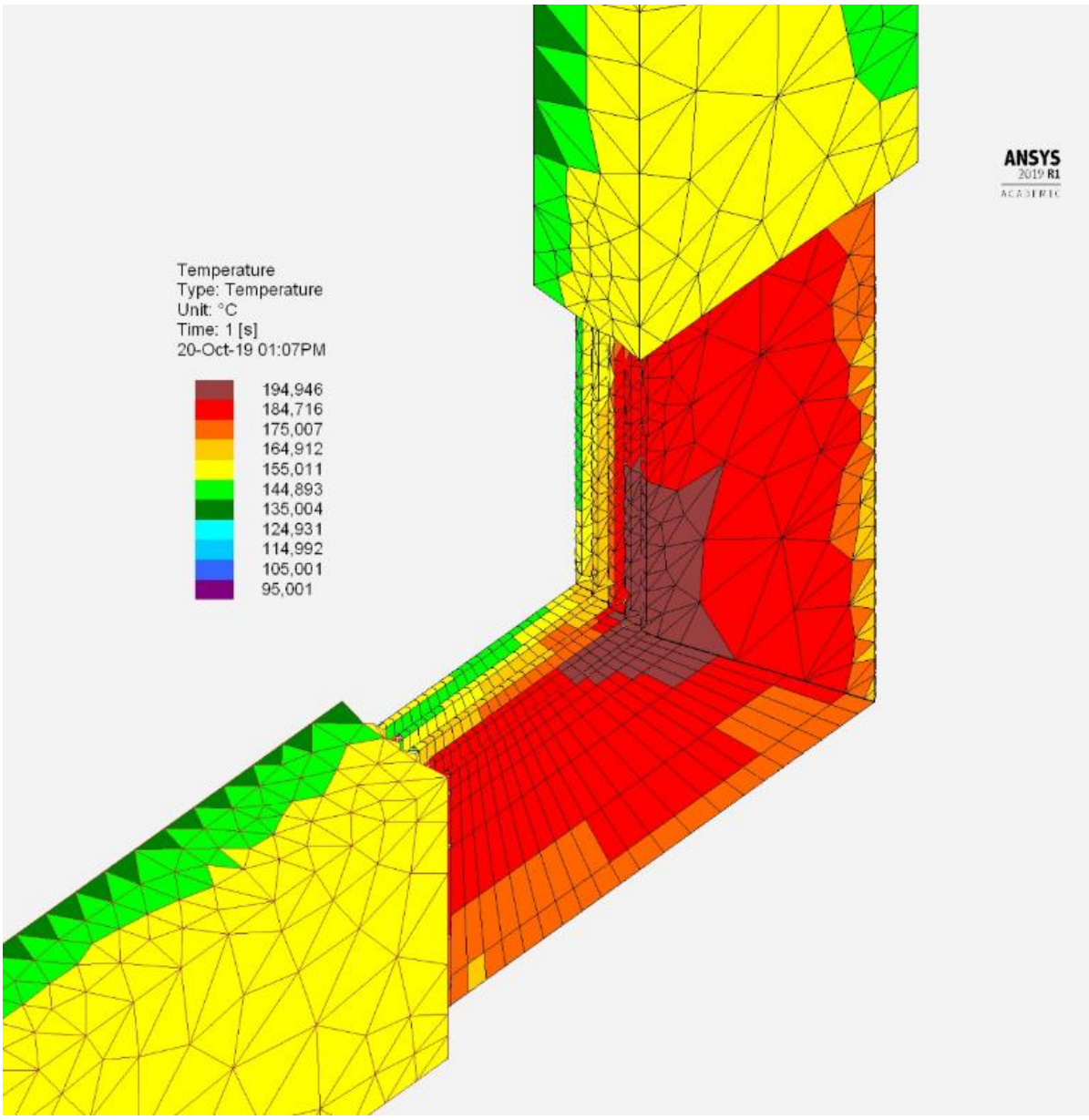
На практике в реальных шинопроводах изменяются как ток нагрузки, так и температура поверхности, что вызвано изменениями в количестве и мощности подключенных потребителей, а также условий среды. Следовательно, первым шагом в решении задачи сети является аппроксимация этих непрерывных переменных серией одношаговых функций с определенным размером шага. Размерность этого шага зависит от задач мониторинга и имеющихся технических возможностей. На каждом подэтапе температура проводника может быть получена путем расчета одношагового отклика, где начальные температуры каждого слоя

представляют собой соответствующие температуры в последний момент предыдущего подэтапа расчета [7].

Как правило, часть процессов, сопровождающихся повышением температуры, носит либо кратковременный характер, либо монотонно нарастающий. В этом случае в силу того, что количество видов аварийных режимов, не сопровождающихся отключением шинопроводов с помощью коммутационных и защитных аппаратов, достаточно мало, можно произвести предварительный расчет данных явлений для критических узлов (мест соединений, угловых компонентов, переходов) и определить характерную последовательность (паттерн) развития процесса нагрева внешней поверхности шинопровода.

Расчетное моделирование шинопровода в литой изоляции для различных режимов нагрузок показало, что при диапазоне температур, характерных для типового размещения шинопроводов в закрытых помещениях, а именно температуре окружающего воздуха от 0 до +40 °С, достаточную точность может обеспечить замер температуры перегрева наиболее горячей точки относительно температуры воздуха. В этом случае используют чуть более простые по устройству и менее точные измерительные приборы. При этом распределение температурной картины по внешней поверхности литой изоляции хорошо характеризует процесс, проходящий (или проходивший) в проводниках. Таким образом, проведение, к примеру, тепловизионной диагностики поверхности шинопровода в литой изоляции, совмещенное со сравнением картины фактического распределения температуры и результатов моделирования позволит установить наличие внутренних повреждений, при этом не нужно будет вскрывать секции шинопровода. При более сложных обстоятельствах, в которых используются шинопроводы, условия отвода тепла с поверхности могут значительно отличаться, что потребует дополнительного изучения, а также внесения поправочных коэффициентов в расчетные модели.

На рисунке представлен результат моделирования процесса нагрева внутренних элементов и поверхности шинопровода с литой изоляцией, выполненного в программном комплексе ANSYS Discovery Live Student. Ограничение, накладываемое студенческой версией данного продукта на количество узлов (элементов) (их должно быть не более 128 000), является достаточным для решения поставленной задачи с необходимой точностью, так как при типовой длине секции до 4 м шаг расчетной сетки трехфазного шинопровода с нулевой рабочей и нулевой защитной шиной не будет превышать 8 см на линейных участках, что согласуется с разрешающей способностью простых тепловизоров и инфракрасных систем слежения (около 5 см).



Графическое представление результата расчета температуры шин
и поверхности корпуса для шинопровода с литой изоляцией

Дальнейшее изучение может быть осуществлено с помощью совмещения расчетной модели, построенной для шинопровода с учетом переменного характера нагрузки, получаемого на основе выявления характерных графиков изменения мощности в течение суток [8], с выборочным контролем температуры внешней поверхности. В данном случае постоянный мониторинг мощности нагрузки или тока, протекающего по шинопроводу, представляет собой более простую техническую задачу, как правило, уже решенную на предприятиях. Значимые превышения измеренной температуры поверхности шинопроводов над расчетными данными могут свидетельствовать о наличии внутренних изменений в структуре изоляции или металлических

элементах шинопровода. В таком случае даже до наступления аварийного режима это позволяет диагностировать начало развития повреждения и путем предупредительной диагностики и возможного ремонта не допустить аварийного выхода данного силового оборудования из строя.

Библиографический список

1. Прогноз потребления электроэнергии и мощности в Новой Москве на период до 2025 года / Ю.В. Агафонова [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 1 (64). С. 70–74.
2. Корнеев К.Б., Осеи-Овусу Р. Реконфигурация существующей электрической сети населенных пунктов на основе данных о загрузке потребителей // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 57–65.
3. Енин А.С., Корнеев К.Б., Узикова Т.И. Специфические аспекты тепловизионного контроля электроконтактных соединений // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. Вып. 7. Тверь: ТвГТУ, 2014. С. 145–148.
4. Распределенный датчик температуры – обнаружение/предотвращение возгораний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.yokogawa.com/cis/solutions/products-and-services/measurement/field-instruments-products/fiber-optic-sensor (дата обращения: 21.02.2024).
5. Busbar Temperature Monitoring in Switchgear Cabinets with Calex Infrared Temperature Sensors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.calex.co.uk/site/wp-content/uploads/2017/12/Busbar-Joints-Temperature-Monitoring-Infrared-Sensors.pdf (дата обращения: 21.02.2024).
6. Корнеев К.Б. Система контроля и прогнозирования состояния контактных соединений электрических сетей: дис. … канд. техн. наук: 05.13.2001. Тверь, 2004. 162 с.
7. Создание систем мониторинга высоковольтных токопроводов с литой изоляцией / Д.И. Ковалев [и др.] // Электрические станции. 2021. № 11. С. 40–46.
8. Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р. Алгоритмические модели управления электрической нагрузкой в системах электроснабжения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (15). С. 40–50.