

Энергетика и электротехника

УДК 621.3.06

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАЗЕМЛИТЕЛЕ НА НАПРЯЖЕНИЕ 10 КВ

А.А. Базаров, О.В. Белый¹

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, Oleg.Belyi@electroshield

Аннотация. Рассматриваются электромагнитные и тепловые процессы в системе токоведущих элементов заземлителя в шкафу распределительного устройства среднего напряжения, протекающие во время короткого замыкания. Режим короткого замыкания является необходимым этапом при испытаниях коммутационных устройств. Возникновение больших токов приводит к значительным электродинамическим и термическим воздействиям. Устойчивость к токам короткого замыкания зависит от длительности, формы кривой тока, а также от распределения плотности тока по сечению токоведущих элементов аппарата.

При проектировании новых устройств проводится комплекс расчетов и испытаний. Применение аналитических методов расчета не позволяет учесть в полном объеме влияние различных факторов. Целью статьи является разработка численной модели электромагнитных и тепловых процессов в заземлителе для повышения точности расчетов, сокращения времени испытаний и определения максимально допустимых значений токов в определении термической стойкости.

Решение проблемы обеспечивается с помощью мультифизической электротепловой модели, построенной с использованием метода конечных элементов. Полученные результаты моделирования электромагнитных и тепловых полей в конструкции заземлителя позволяют определить наиболее нагруженные участки и предусмотреть меры по изменению конструкции с целью повышения термической и динамической стойкости заземлителя.

Ключевые слова: заземлитель, метод конечных элементов, электромагнитные процессы, тепловые процессы, термическая стойкость.

Введение

При эксплуатации коммутационного электрооборудования среднего напряжения возникают аварийные режимы, связанные с протеканием токов короткого замыкания, которые могут привести к повреждениям или сокращению срока



© Автор(ы), 2025

¹ Александр Александрович Базаров, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Олег Викторович Белый, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

службы токоведущих и коммутирующих элементов. Стандартами для разъединителей и заземлителей во включенном состоянии, без процессов коммутации, предусмотрены предельно допустимые значения температуры токоведущих элементов. При отсутствии контакта с органической изоляцией температура токоведущего элемента из меди кратковременно не должна превышать 300 градусов [1]. Тепловое воздействие определяется величиной тока и временем, поэтому допускается использовать разъединители и заземлители при времени короткого замыкания t , превышающем нормированное время короткого замыкания $t_{к.з.}$ с одновременным уменьшением величины номинального кратковременного выдерживаемого тока I_T (ток термической стойкости) до значения I_t , определяемого в соответствии с соотношением

$$I_t^2 \cdot t = I_T^2 \cdot t_{к.з.} \quad (1)$$

В работе рассматриваются процессы термического воздействия на элементы заземлителя, который находится во включенном состоянии, при протекании тока короткого замыкания. Это уменьшает число обязательных видов исследования. Тем не менее расчеты осложнены как зависимостью тока от времени, определяемой свойствами системы электроснабжения, так и конструктивными особенностями заземлителя и шкафа распределительного устройства.

Существующие аналитические методики расчета мощности тепловыделения в проводниках не позволяют учесть все особенности распределения плотности тока и мощности тепловыделения, обусловленные взаимным влиянием токов в проводниках разных фаз, поверхностным эффектом в проводниках и магнитным полем наведенных токов в ферромагнитных стенках шкафа. Величина тока короткого замыкания определяется суммарным сопротивлением всей цепи. Влияние комплексного сопротивления токопроводящих элементов в шкафу с заземлителем на суммарное значение сопротивления минимально, однако перераспределение плотности тока может существенно повлиять на мощность тепловыделения и температуру в различных точках подвижных и неподвижных элементов.

Целью работы является определение погрешности расчетов для электромагнитных и тепловых процессов при использовании линейных моделей по сравнению с более точными нелинейными моделями и определение возможности корректного применения на предварительных этапах исследования.

Для достижения поставленной цели выполнен ряд задач, включающий построение математических моделей и расчеты внутренних источников тепловыделения и распределения температуры для разных вариантов моделей.

При проектировании и исследовании устройств для передачи и коммутации больших токов используются численные методы. Большое внимание уделяется исследованию на термическую устойчивость электрооборудования среднего напряжения [2–5].

При проверке устройств на термическую и электродинамическую стойкость производятся испытания с помощью специального оборудования [6]. При подготовке математических моделей заземлителя особенности испытаний должны быть учтены.

Моделированию электромагнитных и тепловых процессов с помощью специализированного программного обеспечения посвящено много работ в области термической стойкости шинопроводов [7–11,13] и коммутирующей аппаратуры [12, 13].

Формулировка электромагнитной задачи

При использовании векторного магнитного потенциала электромагнитная задача формулируется в виде уравнения Пуассона:

$$\nabla^2 \{\bar{A}\} - j\omega\sigma \{\bar{A}\} - \{\bar{J}\} = 0. \quad (2)$$

Основное уравнение дополняется граничными условиями на поверхности, достаточно удаленной от элементов системы:

$$\{\bar{A}\} = 0 \text{ на } S_B. \quad (3)$$

Моделирование в Comsol для трехмерной области осуществляется при использовании системы из двух уравнений:

$$\nabla \cdot (j\omega\sigma_3 + \sigma_3 \nabla V - \mathbf{J}^e) = 0; \quad (4)$$

$$(j\omega\sigma_3 \mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) + \sigma_3 \nabla V) = \mathbf{J}^e. \quad (5)$$

Здесь: σ_3 – электропроводность; \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал; V – скалярный электрический потенциал; \mathbf{J}^e – вектор источников (плотность тока); μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_r – относительная магнитная проницаемость среды.

Электропроводность нагреваемых проводников для упрощения принята неизменной на всем протяжении процесса нагрева, так как в диапазоне рассматриваемых температур (0–300 градусов) она изменяется незначительно. В рассматриваемой задаче магнитные материалы использовались при изготовлении стенок шкафа. Относительная магнитная проницаемость для них определяется в процессе решения с помощью кривой намагничивания.

Формулировка тепловой задачи

Моделирование тепловых процессов в системе «проводники – окружающая среда» производится с помощью решения уравнения теплопроводности, записанного в виде уравнения в частных производных, которое дополнено граничными условиями. Источники тепла в данной задаче определяются при решении электромагнитной задачи и могут быть непосредственно экспортированы в виде распределения мощности или заданы в специально сформированных геометрических областях для случая проведения тепловых расчетов отдельно от электромагнитных процессов.

Нестационарное уравнение теплопроводности для трехмерной области формулируется в декартовой системе координат в следующем виде:

$$\gamma C_P \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q, \quad (6)$$

с начальными условиями

$$T(x, y, z, 0) = \text{const} \quad (7)$$

и граничными условиями

$$\lambda \nabla T = \alpha [T - T_c] + \varepsilon \sigma [T_1^4 - T_2^4]. \quad (8)$$

Здесь: $T(r, x, z, \tau)$ – распределение температуры в заготовке в произвольный момент времени τ ; T_c – температура окружающей среды; T_1, T_2 – значения (распределения) температуры поверхностей, между которыми происходит теплообмен излучением (вместо одной из поверхностей может выступать окружающая

среда); $C_p(x, y, z, t)$, $\gamma(x, y, z, \tau)$, $\lambda(x, y, z, \tau)$ – соответственно удельные теплоемкость, теплопроводность и плотность металла; $\alpha, \varepsilon, \sigma$ – коэффициенты конвективного теплообмена, степень черноты и коэффициент излучения поверхности материала; Q – удельная мощность источников внутреннего тепловыделения.

Моделирование электромагнитных процессов

Заземлитель состоит из трехфазного замыкающего устройства, размещенного внутри стального корпуса. На рис. 1 показана геометрическая модель заземлителя, содержащая необходимые конструктивные элементы и шину 3, обеспечивающую замыкание фазных цепей. С нижней стороны соединение осуществляется с помощью трубчатой шины 2, являющейся конструктивным элементом. Модель заземлителя содержит систему подвижных 4 и неподвижных 5 ножей, представляющих собой шины прямоугольного сечения. Особенности задания источников тока в используемой программе приводят к заданию различных физических свойств для отдельных участков шин. Задание необходимого значения тока на участке 7 проводника обеспечивается при нулевой электропроводности и расчетном значении плотности тока и сдвига по фазе. Такое сочетание приводит к получению нужной величины тока независимо от сопротивления других элементов цепи, подключенных последовательно. Для проверки корректности расчетов предусмотрен участок 8 такой же длины с ненулевой электропроводностью.

В качестве материала для подвижных и неподвижных контактов использована медь. Корпус шкафа выполнен из ферромагнитной стали.

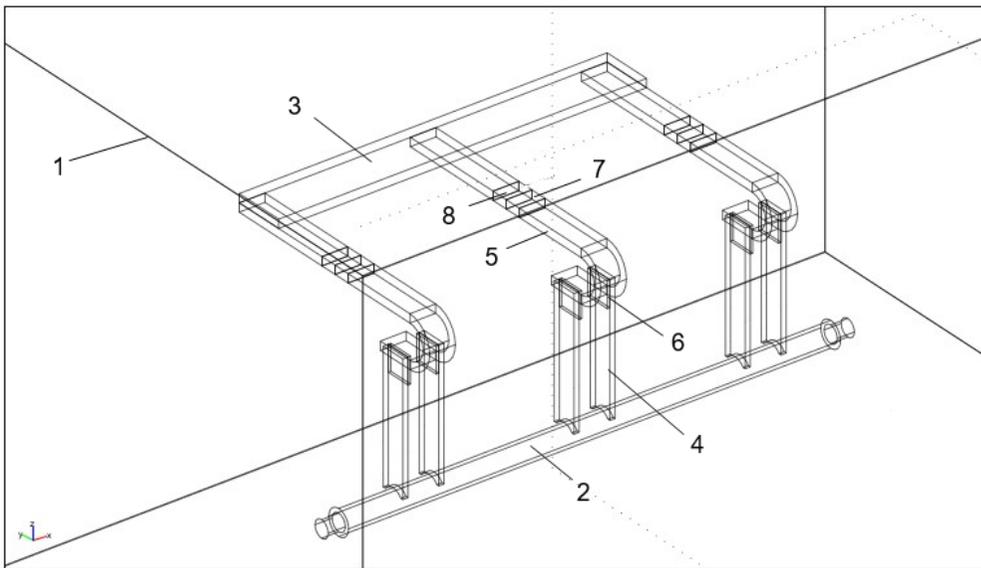


Рис. 1. Геометрическая модель заземлителя: 1 – корпус шкафа с заземлителем; 2 – вал подвижных ножей; 3 – шинная перемычка; 4 – подвижный нож; 5 – неподвижный нож; 6 – вспомогательная накладка на подвижном ноже; 7 – вставка для задания источника тока; 8 – вставка для контроля тока

В качестве расчетного тока заземлителя заданы значения 31,5 кА со сдвигом по фазе 120 градусов.

Решение трехмерной электромагнитной задачи, содержащей магнитные материалы, требует гораздо больших затрат времени. Поэтому выполнены расчеты для нескольких вариантов задания магнитной проницаемости для стенок шкафа. Наиболее правильный подход обеспечивает задание кривой намагничивания. Для двух других вариантов приняты значения магнитной проницаемости, равные 160 и 300. Более сложные варианты задания постоянных значений проницаемости на различных участках не рассматривались.

Геометрическая модель заземлителя показана в соответствии с возможностями и требованиями программы, в которой моделируется электромагнитный процесс. Источник трехфазного тока задан на прямолинейных участках 8 для каждой фазы в виде плотности тока. В этом случае токи между фазами замыкаются с помощью перемычки 3 и вала 2. При нулевой электропроводности участка 8 и аналогичных в других фазах ток определяется произведением плотности тока на сечение и не зависит от сопротивления цепи, что соответствует понятию источника тока.

Расчет электромагнитных процессов в шкафу с заземлителем при задании кривой намагничивания в стенках шкафа

В качестве материала для стенки в расчетной модели принято обычное железо с максимальным значением магнитной проницаемости, равным 1200 при отсутствии напряженности магнитного поля. В данном случае термин «железо» соответствует сталям, не относящимся к электротехническим. Магнитные свойства железа и конструкционных малоуглеродистых сталей близки.

В результате расчета получены значения мощности тепловыделения в элементах заземлителя, шинной перемычке 3, стенках шкафа 1 и на валу 2 (ось вращения подвижных контактов).

В перемычке мощность тепловыделения составляет $P = 6.19$ кВт, в корпусе вала $P = 4.92$ кВт, в стенках шкафа $P = 6.42$ кВт.

Значения мощности в подвижных и неподвижных контактах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Мощности тепловыделения в элементах заземлителя

| Полюс | $P_{\text{ов.л}}$, кВт | $P_{\text{ов.пр}}$, кВт | $P_{\text{нд}}$, кВт | $P_{\text{сум}}$, кВт |
|-------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| А | 1.1 | 1.94 | 8.26 | 11,3 |
| В | 2.16 | 1.08 | 8.27 | 11,51 |
| С | 1.99 | 1.02 | 8.16 | 11,17 |

Суммарная мощность тепловыделения в заземлителе равна 33,98 кВт.

Расчет электромагнитных процессов в шкафу с заземлителем при задании постоянной магнитной проницаемости $\mu = 160$ в стенках шкафа

В перемычке мощность тепловыделения составляет $P = 6.02$ кВт, в корпусе вала $P = 4.92$ кВт, в стенках шкафа $P = 1.64$ кВт.

Значения мощности в подвижных и неподвижных контактах представлены в табл. 2.

Таблица 2

Мощности тепловыделения в элементах заземлителя

| Полос | $P_{\text{ов.л}}$, кВт | $P_{\text{ов.пр}}$, кВт | $P_{\text{нд}}$, кВт | $P_{\text{сум}}$, кВт |
|-------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| А | 0.89 | 1.82 | 7.81 | 10,52 |
| В | 1.33 | 1.81 | 8.19 | 11,33 |
| С | 0.79 | 1.81 | 7.99 | 10,59 |

Суммарная мощность в заземлителе $P = 32.44$ кВт.

Расчет электромагнитных процессов в шкафу с заземлителем при задании постоянной магнитной проницаемости $\mu = 300$ в стенках шкафа

В перемычке мощность тепловыделения составляет $P = 6.2$ кВт, в корпусе вала $P = 4.92$ кВт, в стенках шкафа $P = 1.85$ кВт.

Значения мощности в подвижных и неподвижных контактах представлены в табл. 3.

Таблица 3

Мощности тепловыделения в элементах заземлителя

| Ф | $P_{\text{ов.л}}$, кВт | $P_{\text{ов.пр}}$, кВт | $P_{\text{нд}}$, кВт | $P_{\text{сум}}$, кВт |
|---|-------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| А | 1.1 | 1.94 | 8.26 | 11,3 |
| В | 1.92 | 1.4 | 8.25 | 11,57 |
| С | 0.91 | 2.14 | 8.36 | 11,41 |

Суммарная мощность тепловыделения 34,28 кВт.

Результаты расчетов мощности тепловыделения для вариантов задания магнитной проницаемости представлены в табл. 4. Для сравнения определены значения отклонения суммарной мощности тепловыделения относительно варианта с заданием кривой намагничивания.

Таблица 4

Расчетные значения мощности тепловыделения в контактной системе заземлителя при разных значениях магнитной проницаемости шкафа

| № | μ | $P_{\text{сум}}$, кВт | $P_{\text{ст}}$, кВт | ε , % |
|---|--------------|------------------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | $\mu = f(H)$ | 33,98 | 6,4 | 0 |
| 2 | 160 | 32,44 | 1,64 | -4,5 |
| 3 | 300 | 34,28 | 1,85 | 0,8 |

Приведенные в таблице значения мощности тепловыделения в токоведущих элементах заземлителя $P_{\text{сум}}$ (подвижные и неподвижные контакты заземлителя без перемычки и вала) для разных вариантов задания магнитной проницаемости имеют незначительную разницу. В корпусе шкафа $P_{\text{ст}}$ разница более значитель-

на, но величина мощности невелика и мало скажется на температуре заземлителя.

Моделирование электромагнитных процессов в системе проводников заземлителя происходит при использовании большого объема оперативной памяти. Наличие ферромагнитных элементов в виде стальных листов, служащих стенками шкафа, приводит к дополнительному замедлению расчетов из-за того, что итерационные методы решения нелинейных задач требуют больше шагов. На примере данной задачи при переходе с линейной на нелинейную модель электромагнитной задачи наблюдается увеличение оперативной памяти с 70 до 100 Гб, а времени счета – в два раза, с 10 до 20 часов (последний показатель зависит от вычислительной мощности процессора). При многократных расчетах потери времени становятся нежелательными. Возникает вопрос об обосновании применения линейных моделей для ускорения вычислений.

Если принять расчет для нелинейной модели за эталон, то погрешности могут быть определены для разных вариантов задания магнитной проницаемости в виде постоянной величины, как показано в табл. 4.

Корректное обоснование средней величины является непростой задачей. Кроме непосредственной зависимости от расчетного тока в заземлителе играют значительную роль расстояния между стенками корпуса шкафа и токоведущими элементами.

Принятые в качестве характеристик стали значения магнитной проницаемости, равные 160 и 300, являются отражением влияния электромагнитного поля шин замыкателя на мощность тепловыделения в листах корпуса. Как видно из приведенных значений в таблицах, совпадения всех параметров добиться сложно при таком подходе. Наблюдается не только влияние поля шин на проницаемость стального листа, но и влияние суммарного магнитного поля на распределение плотности тока в шинах. Модель построена таким образом, что токи совпадают для всех трех случаев задания магнитных свойств. Ввиду идентичности картины распределения токов информация о них не представлена. Наблюдаемые отличия в мощности тепловыделения объясняются небольшими изменениями в распределении плотности тока, а также разным сдвигом по фазе. Несмотря на то, что задача является стационарной (квазистационарной), расчетные величины при постпроцессорной обработке меняются в зависимости от задания фазы контролируемой величины. Суммарный полный ток для каждой пары имеет неизменную величину в пределах вычислительной погрешности.

Тепловые расчеты

Решение тепловой задачи выполняется за несколько шагов по времени. Объединение с электромагнитной задачей нежелательно, так как это потребует неоправданно больших затрат времени, особенно с учетом изменения свойств материалов.

Задание плотности источников тепловыделения выполняется вручную для каждой подобласти в соответствии со значениями, найденными при решении электромагнитной задачи.

Удельное сопротивление меди изменяется с увеличением температуры и рассчитывается по формулам

$$\Delta R = \alpha \cdot R \cdot \Delta T ; \quad (9)$$

$$R_2 = R_1 \cdot (1 + \alpha(T_2 - T_1)), \quad (10)$$

где ΔR – изменение удельного сопротивления; R – удельное сопротивление при температуре, принятой в качестве базового уровня (обычно $20\text{ }^\circ\text{C}$); ΔT – градиент температур; α – температурный коэффициент удельного сопротивления для данного материала (размерность $^\circ\text{C}^{-1}$). В диапазоне от 0 до $100\text{ }^\circ\text{C}$ для меди принят температурный коэффициент $0,004\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Рассчитаем удельное сопротивление меди при $60\text{ }^\circ\text{C}$:

$$R_{60^\circ\text{C}} = R_{20^\circ\text{C}} \cdot (1 + \alpha(60 - 20)) = 0,0172 \cdot (1 + 0,004 \cdot 40) \approx 0,02\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}.$$

При протекании тока в проводнике выделяется мощность

$$P = I^2 \cdot R. \quad (11)$$

Если величина тока не зависит от температуры, то мощность увеличивается пропорционально изменению температуры $P \sim T$. Это справедливо в случае, когда площадь сечения проводника, через которую течет ток, не изменяется, то есть глубина проникновения тока заведомо больше толщины провода в диапазоне рабочих температур. Такое соотношение толщины провода (шины) и глубины проникновения тока выполняется для медных шин для токов частотой 50 Гц , если толщина проводника менее 10 мм . В таком случае мощность тепловыделения пропорциональна температуре проводника:

$$P = I^2 \cdot R_1 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)). \quad (12)$$

В тепловой задаче, рассматриваемой отдельно от электромагнитной задачи, перерасчет источников тепла не производится, поэтому для учета температурной зависимости в функцию источников тепловыделения вводится коэффициент, отражающий влияние температуры:

$$Q(T) = Q_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)). \quad (13)$$

Результаты моделирования тепловых процессов в токоведущих элементах представлены на рис. 2–6. На рис. 2–4 наблюдается зависимость температуры на линейных участках от расстояния до краев, где происходит отвод тепла к более массивным элементам, таким как перемычка.

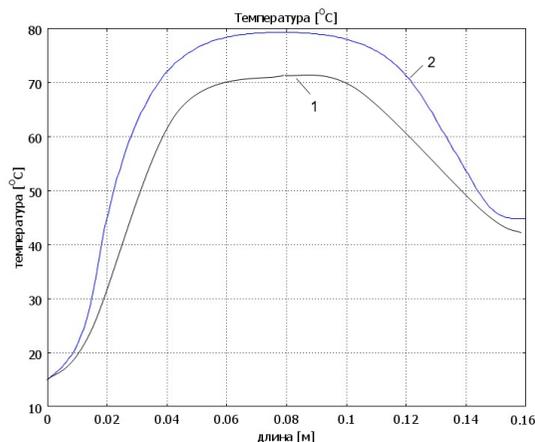


Рис. 2. Диаграммы температуры по длине подвижного ножа заземлителя в момент времени 3 с : 1 – при постоянной мощности тепловыделения; 2 – при возрастающей мощности тепловыделения

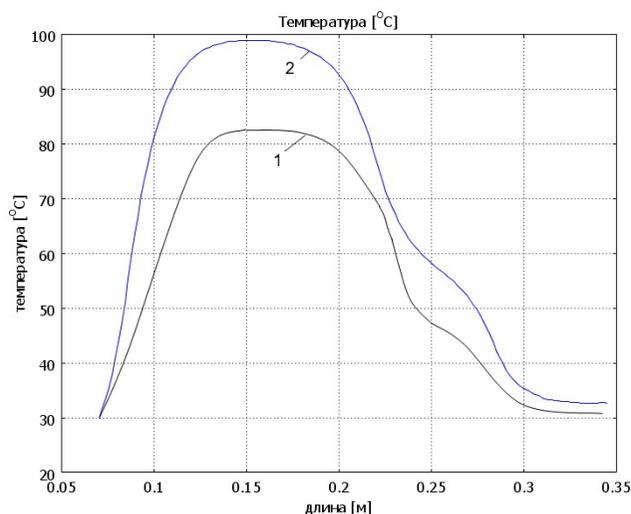


Рис. 3. Диаграммы температуры по длине средней неподвижной шины заземлителя в момент времени 3 с: 1 – при постоянной мощности тепловыделения; 2 – при возрастающей мощности тепловыделения

Сравнение результатов расчета для линейной и нелинейной моделей показало разницу в 10–17 градусов.

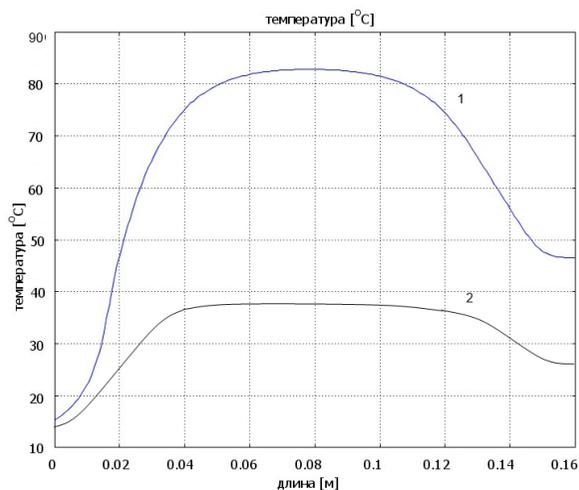


Рис. 4. Диаграммы температуры по длине подвижных ножей заземлителя при возрастающей мощности тепловыделения в момент времени 3 с: 1 – средняя фаза; 2 – крайняя фаза

Представленные на рис. 5 графики температуры в наиболее важных точках (контакты) показывают допустимые значения. Нужно сделать уточнение, что при расчете не учитывалось наличие переходного сопротивления контактов, которое может существенно повлиять на уровень температуры в месте контакта.

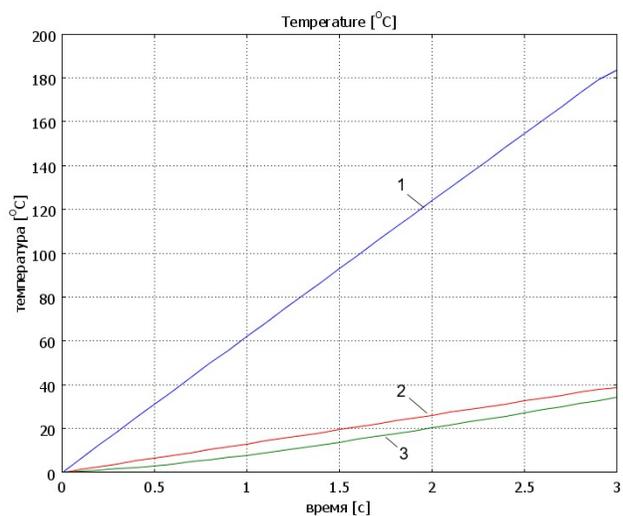


Рис. 5. Графики температуры при нагреве током 31.5 кА в точках заземлителя: 1 – поверхность вала; 2 – точка на линии между подвижным и неподвижным контактами; 3 – точка в месте подвода внешних шин

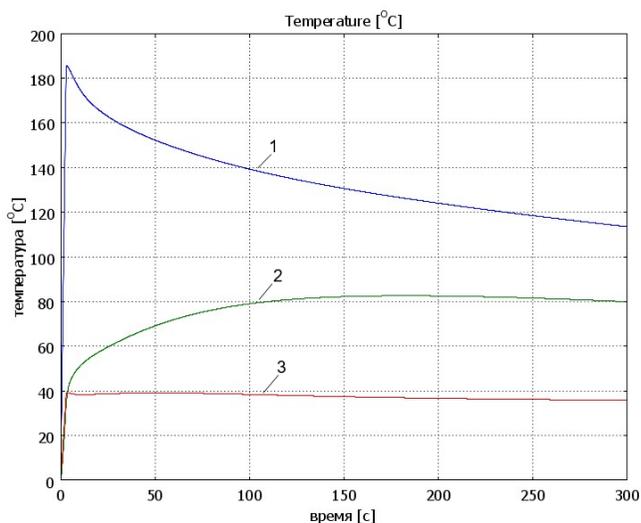


Рис. 6. Графики температуры при нагреве током 31.5 кА и последующем охлаждении в точках заземлителя: 1 – поверхность вала; 2 – между подвижным и неподвижным контактами; 3 – точка подвода внешних шин

Отрицательно сказывается на уровне максимальной температуры наличие материалов из немагнитной стали. При изготовлении вала из такой стали происходит значительный перегрев места соединения вала с шинами подвижных кон-

тактов. Измерение температуры на реальной установке затруднено, поэтому данная информация позволяет учесть влияние данного узла на ресурс устройства.

Заключение

Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в токоведущих частях заземлителя показало, что полученные значения мощности тепловыделения и диаграммы температуры подтверждают соответствие заданным характеристикам: в режиме короткого замыкания в течение 3 секунд не происходит нагрева токоведущих элементов выше 100 градусов. Однако применение стальных немагнитных конструктивных элементов недопустимо из-за повышенного тепловыделения и дополнительного нагрева подвижных контактов.

Использование упрощенных линейных моделей для электромагнитных задач допустимо, так как при обосновании значения магнитной проницаемости стенок шкафа вычислительная погрешность, связанная с магнитными свойствами, становится менее 1 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 14693-90. Устройства комплектные распределительные негерметизированные в металлической оболочке на напряжение до 10 кВ. Общие технические условия. Введ. 1991-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1990. 25 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005012> (дата обращения: 22.04.2025).
2. Клименко Б.В., Байда Е.И., Гречко А.М., Боев С.А. О термическом действии токов коротких замыканий в электрических цепях средних напряжений, защищаемых вакуумными выключателями // Электротехника и электромеханика. 2007. № 1. С. 30–33. EDN: RZDNCJ
3. Шульга Р.Н., Хренников А.Ю. Тепловое действие токов короткого замыкания и термическая стойкость электрооборудования // Энергетик. 2022. № 5. С. 14–19. EDN: XMJEFY
4. Нехожин Е.В., Буслаев Е.А., Квашинин С.А., Конопатин Е.И., Макаев Е.И. Проверка термической, электродинамической стойкости и коммутационной способности выключателей в сети собственных нужд гидроэлектростанций // Современные тенденции в науке, технике, образовании: сб. науч. тр. по материалам III Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. 2018. Ч. 1. С. 72–74. EDN: YXFGDC
5. Александров Р.И., Егоров Е.Г., Кулагина А.Г., Луия Н.Ю., Пичугин В.Н., Федоров Р.В. Исследование температурных режимов контактов автоматического выключателя при отключении тока короткого замыкания // Электротехника. 2020. № 8. С. 2–5. EDN: ATQQAF
6. Бешенцев Н.А., Ларин В.С., Милкин Е.А., Тимохин Д.А. Определение параметров ударного трансформатора для испытания на стойкость к токам короткого замыкания // Электричество. 2023. № 8. С. 23–29. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-8-23-29. EDN: THXZPI
7. Терзян А.А., Сукиасян Г.С. О численных методах решения задач электромагнитного поля // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 6. С. 3–14. EDN: NCLSAF
8. Панова Е.А., Варганова А.В., Панарина М.С. Автоматизированная проверка однополосных шин прямоугольного сечения по условиям термической электродинамической стойкости // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1 (46). С. 28–33. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-28-33. EDN: SDFPYO
9. Теличко Л.Я., Басов П.М. Применение математического моделирования для исследования провалов напряжения, возникающих при коротких замыканиях в распределительных сетях высокого напряжения // Электротехнические комплексы и системы управления. 2010. № 4. С. 12–17. EDN: NAXJLN
10. Цицьян Г.Н., Антипов М.Ю. Электродинамические силы в ошиновке электротехнического оборудования автономных систем // Электротехника. 2018. № 4. С. 53–57. EDN: YUCCNH
11. Цицьян Г.Н., Бобровников П.В. Об электродинамических силах между параллельными шинами с током // Электричество. 2016. № 11. С. 44–48. EDN: WXQTPJ

12. *Krcun M., Zubcic M., Dlabač T.* Electromechanical Analysis of the Medium Voltage Earthing Switch due to Short-Time and Peak Withstand Current Test // *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 12. P. 3189. DOI:10.3390/en12163189
13. *Абаешева У.Н., Фризен В.Э., Назаров С.Л.* Численное моделирование испытания на термостойкость закрытого трехфазного шинопровода 10 кВ в режиме трехфазного короткого замыкания // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2022. № 43. С. 29–48. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.02. EDN: BSHELL
14. *Саушев А.В., Туганов Р.Б., Бычков Е.В., Подшивалов Е.С.* Математическое моделирование токовой интенсивности в шинах распределительных устройств при геометрических неоднородностях // *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2023. № 1 (162). С. 20–28. EDN: DRYUIG
15. *Грачева Е.И., Лазаревич А.С.* Исследование теплофизических процессов в замкнутых контактах низковольтных коммутационных аппаратов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2004. № 5–6. С. 102–106. EDN: RAPNWH
16. *Лунев М.К., Фетисов Л.В.* Исследование теплофизических процессов в замкнутых контактах низковольтных автоматических выключателей // *Перспективные научные исследования: опыт, проблемы и перспективы развития: сб. науч. ст. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2022*. С. 28–33. EDN: MZNTSD

Статья поступила в редакцию 22.04.2025

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC AND THERMAL PROCESSES IN A GROUNDING DEVICE AT A VOLTAGE OF 10 KV

*A.A. Bazarov, O.V. Belyi*¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, Oleg.Belyi@electroshield

Abstract. *The paper considers electromagnetic and thermal processes in the system of current-carrying elements of the grounding device in the medium voltage switchgear cabinet, occurring during a short circuit. The short-circuit mode is a necessary stage in testing switching devices. The occurrence of large currents leads to significant electrodynamic and thermal effects. Resistance to short-circuit currents depends on the duration, shape of the current curve, as well as on the distribution of the current density over the cross-section of the current-carrying elements of the device.*

When designing new devices, a set of calculations and tests is carried out. The use of analytical calculation methods does not allow to fully take into account the influence of various factors. The aim of the article is to develop a numerical model of electromagnetic and thermal processes in a grounding device to improve calculation accuracy, reduce testing time, and determine the maximum permissible current values when assessing thermal stability.

The problem is solved using a multiphysical electrothermal model built using the finite element method. The obtained results of modeling electromagnetic and thermal fields in the design of the ground electrode system allow us to determine the most loaded sections and provide measures to change the design in order to increase the thermal and dynamic resistance of the ground electrode system.

Keywords: *ground electrode system, finite element method, electromagnetic processes, thermal processes, thermal resistance.*

REFERENCES

1. GOST 14693-90. Ustrojstva komplektnye raspredelitel'nye negermetizirovannye v metallicheskoj obolochke na napryazhenie do 10 kV. Obshhie tehnicheckie uslovija [Unsealed metal-enclosed complete distribution assemblies for voltages up to 10 kV. General technical specifications. Introduced]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005012> (data obrashhenija 22.04.2025). (In Russian)
2. *Klimenko B.V., Bajda E.I., Grechko A.M., Boev S.A.* O termicheskom dejstvii tokov korotkih zamykanij v elektricheskikh cepyah srednih napryazhenij, zashchishchaemyh vakuumnymi vyklyuchatelyami [On the Thermal Effect of Short-Circuit Currents in Medium-Voltage Electrical Circuits Protected by Vacuum Circuit Breakers] // *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2007. No. 1. Pp. 30–33. (In Russian)
3. *Shulga R.N., Hrennikov A.Yu.* Teplovoe dejstvie tokov korotkogo zamykaniya i termicheskaya stojkost elektrooborudovaniya // *Energetik*. 2022. No. 5. Pp. 14–19. (In Russian)
4. *Nekhozhin E.V., Buslaev E.A., Kvashnin S.A., Konopatin E.I., Makaev E.I.* Proverka termicheskij, elektrodinamicheskij stojkosti i kommutacionnoj sposobnosti vyklyuchatelej v seti sobstvennyh nuzhd gidroelektrostantsii [Verification of Thermal, Electrodynamic Withstand



© The Author(s), 2025

¹ *Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Industrial Power Supply.*

Oleg V. Bely, Postgraduate Student, Dept. of Industrial Power Supply.

- Capability, and Switching Capacity of Circuit Breakers in the Auxiliary Power Network of a Hydroelectric Power Plant] // *Sovremennye tendencii v nauke, tekhnike, obrazovanii: sb. nauch. tr. po materialam III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 2018. V. 2. Ch. 1. P. 72–74. (In Russian)*
5. *Aleksandrov R.I., Egorov E.G., Kulagina A.G., Luiya N.Yu., Pichugin V.N., Fedorov R.V.* Issledovanie temperaturnykh rezhimov kontaktov avtomaticheskogo vyklyuchatelya pri otklyuchenii toka korotkogo zamykaniya [Study of Temperature Regimes of Circuit Breaker Contacts During Short-Circuit Current Interruption] // *Elektrotehnika. 2020. No. 8. Pp. 2–5. (In Russian)*
 6. *Beshencev N.A., Larin V.S., Milkin E.A., Timohin D.A.* Opredelenie parametrov udarnogo transformatora dlya ispytaniya na stojkost k tokam korotkogo zamykaniya [Determination of the parameters of an impulse transformer for short-circuit current withstand testing] // *Elektrichestvo. 2023. No. 8. Pp. 23–29. DOI:10.24160/0013-5380-2023-8-23-29. (In Russian)*
 7. *Terzyan A.A., Sukiasyan G.S.* O chislennykh metodakh resheniya zadach elektromagnitnogo polya [On Numerical Methods for Solving Electromagnetic Field Problems] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika. 2010. No. 6. Pp. 3–14. (In Russian)*
 8. *Panova E.A., Varganova A.V., Panarina M.S.* Avtomatizirovannaya proverka odnopolosnykh shin pryamougolnogo secheniya po usloviyam termicheskoy elektrodinamicheskoy stojkosti [Automated Verification of Single-Bus Rectangular Conductors for Thermal and Electrodynamic Withstand Capability] // *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы. 2020. No. 1 (46). Pp. 28–33. DOI: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-28-33. (In Russian)*
 9. *Telichko L.Ya., Basov P.M.* Primenenie matematicheskogo modelirovaniya dlya issledovaniya provalov napryazheniya, voznikayushchih pri korotkikh zamykaniyakh v raspredelitelnykh setyakh vysokogo napryazheniya [Application of Mathematical Modeling to Study Voltage Sags Caused by Short Circuits in High-Voltage Distribution Networks] // *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya. 2010. No. 4. Pp. 12–17. (In Russian)*
 10. *Cicikyan G.N., Antipov M.Yu.* Elektrodinamicheskie sily v oshinovke elektrotekhnicheskogo oborudovaniya avtonomnykh sistem [Electrodynamic Forces in Busbar Systems of Autonomous Power Equipment] // *Elektrotehnika. 2018. No. 4. Pp. 53–57. (In Russian)*
 11. *Cicikyan G.N., Bobrovnikov P.V.* Ob elektrodinamicheskikh silah mezhdru parallelnymi shinami s tokom [On Electrodynamic Forces Between Current-Carrying Parallel Busbars] // *Elektrichestvo. 2016. No. 11. Pp. 44–48. (In Russian)*
 12. *Krcum M., Zubcic M., Dlabac T.* Electromechanical Analysis of the Medium Voltage Earthing Switch due to Short-Time and Peak Withstand Current Test // *Energies. 2019. Vol. 12. No. 12. P. 3189. DOI: 10.3390/en12163189*
 13. *Abasheva U.N., Frizen V.E., Nazarov S.L.* Chislennoe modelirovanie ispytaniya na termostojkost zakrytogo trekhfaznogo shinoprovoda 10 kV v rezhime trekhfaznogo korotkogo zamykaniya [Numerical Simulation of Thermal Withstand Testing for a 10 kV Enclosed Three-Phase Busduct Under Three-Phase Short-Circuit Conditions] // *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2022. No. 43. Pp. 29–48. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.02. (In Russian)*
 14. *Saushev A.V., Tuganov R.B., Bychkov E.V., Podshivalov E.S.* Matematicheskoe modelirovanie tokovoy intensivnosti v shinakh raspredustrojstv pri geometricheskikh neodnorodnostyakh [Mathematical Modeling of Current Intensity in Busbars of Distribution Devices with Geometric Inhomogeneities] // *Avtomatizatsiya i IT v energetike. 2023. No. 1 (162). Pp. 20–28. (In Russian)*
 15. *Gracheva E.I., Lazarevich A.S.* Issledovanie teplofizicheskikh processov v zamknutykh kontaktakh nizkovol'tnykh kommutatsionnykh apparatov [Investigation of Thermophysical Processes in Enclosed Contacts of Low-Voltage Switching Devices] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki. 2004. No. 5–6. Pp. 102–106. (In Russian)*
 16. *Lunev M.K., Fetisov L.V.* Issledovanie teplofizicheskikh processov v zamknutykh kontaktakh nizkovol'tnykh avtomaticheskikh vyklyuchatelej [Study of Thermophysical Processes in Enclosed Contacts of Low-Voltage Circuit Breakers] // *Perspektivnye nauchnye issledovaniya: opyt, problemy i perspektivy razvitiya: sb. nauch. st. po materialam VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Ufa, 2022. Pp. 28–33. (In Russian)*