

УДК 629.423.31

Модель термомеханических напряжений в зоне «изоляция — проводник» тяговых электродвигателей локомотивов

М. А. Шрайбер

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шрайбер М. А. Модель термомеханических напряжений в зоне «изоляция — проводник» тяговых электродвигателей локомотивов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 41–49. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-41-49

Аннотация

Цель: рассмотреть задачу повышения срока службы и надежности тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов; выполнить оценку влияния термомеханических напряжений на срок службы их изоляционного материала. **Методы:** основным методом исследования и расчета температурных полей выбрана теория теплопередачи в многослойных материалах и метод конечных элементов, выполненный в программном пакете SolidWorks. **Результаты:** итоги исследования показывают, что термомеханические напряжения играют значительную роль в процессе динамического термического старения системы изоляции обмоток ТЭД. Была разработана методика для численного исследования напряженно-деформированного состояния материала изоляции ТЭД на различных этапах статического и циклического нагружения. Установлено, что основным фактором, определяющим интенсивность старения изоляции, является влияние знакопеременных циклических термомеханических напряжений, а не термохимическое разрушение пропиточного состава. Получены аналитические выражения для оценки напряженно-деформированного состояния изоляции ТЭД, которые отличаются тем, что они требуют сравнительно небольшого объема исходных данных и позволяют выполнить прочностные расчеты с учетом особенностей системы электропривода. Разработана приближенная прогнозирующая модель для оценки межфазных термических напряжений в сборке материалов паза обмотки ТЭД. Материал изоляции считается линейно-эластичным при уровне деформации ниже предела текучести. Соединяемые компоненты можно рассматривать с точки зрения структурного анализа как удлиненные прямоугольные пластины, испытывающие линейные упругие деформации. **Практическая значимость:** результаты анализа могут быть использованы для оценки термомеханических напряжений в пропиточных материалах ТЭД и аналогичных им. Разработанные методы определения напряженного состояния изоляции ТЭД рекомендуются к практическому использованию.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель локомотива, тепловые процессы электрических машин, старение изоляции, термомеханические напряжения, надежность электрических машин локомотивов

Введение

Характерной чертой современных материалов, используемых при производстве тяговых электродвигателей (ТЭД) и разработанных в соответствии со стратегией предотвращения повреждений, является то, что

уровень их повреждения может либо оставаться постоянным, либо увеличиваться, но никогда не снижается самопроизвольно. Успешная приостановка и замедление роста усталостных трещин и расслоений достигаются с помощью постоянного совершенствования

изоляционных материалов и технологии изготовления ТЭД.

Если, несмотря на эти усилия, повреждение происходит, его распространение остается неопределенным, что снижает общую надежность и работоспособность изоляции ТЭД. В настоящее время все попытки текущего ремонта сосредоточены на заделке трещин, повторном нанесении защитного покрытия, восстановлении пропитки и замедлении образования трещин в результате механического воздействия. В итоге проводимые ремонтные мероприятия не всегда приводят к ожидаемому положительному результату. Перечисленные методы ремонта практически не эффективны для устранения невидимых микротрещин глубоко внутри изоляции ТЭД. Заживление может происходить посредством физических или химических процессов, которые в определенной степени постепенно устраняют внутренние дефекты и могут рассматриваться как процедуры, противоположные повреждению.

Чтобы правильно оценить долговечность изоляции тяговых электродвигателей, необходимо хорошее знание реакции материалов, из которых она состоит, на механические нагрузки и нагрузки окружающей среды. Это особенно верно в отношении участков изоляции ТЭД, которые расположены в местах, где осмотр и обслуживание затруднены, а чаще всего даже невозможны.

Обычно предполагается, что изоляционный материал подвержен только негативному воздействию термического окисления. Однако актуальные исследования показывают, что циклическое изменение нагрузки приводит к возникновению циклических изменений температуры в обмотках, что способствует возникновению значительного температурного градиента [1–3]. Температура медного проводника обычно существенно отличается от

температуры стального сердечника, что вызывает тепловое расширение элементов обмотки. Чем длиннее обмотка, тем больше общее расширение проводников. В результате возникают значительные деформации материала изоляции, особенно в осевом направлении [4].

К сожалению, основная физическая природа влияния скорости деформации на многослойные материалы до сих пор не совсем понятна. Этот недостаток знаний проистекает из многих сложностей их поведения, некоторые из которых перечислены ниже:

- неоднородный и анизотропный характер;
- большой выбор составляющих материалов;
- зависимость от времени реакция (вязкоупругость, старение, термическое или химическое разложение, кристаллизация, остаточное отверждение, поглощение влаги или растворителя);
- чувствительность параметров обработки (условия отверждения, пустоты, кристалличность, волнистость стеклоткани).

Поскольку механическое поведение изоляции ТЭД как многослойного материала зависит от скорости деформации, исследователи часто пытаются учесть влияние частоты при моделировании усталости. Более того, с практической точки зрения частота, с которой проводятся испытания на усталость, является одним из основных определяющих факторов продолжительности испытания.

Рассмотрим приближенную аналитическую модель для оценки межфазных напряжений в компонентах обмотки (сталь, изоляция и проводник), разработанную для случая эластичного пропиточного состава [7]. Термическая нагрузка может действовать как при нормальной эксплуатации многокомпонентных материалов, таких как обмотки тяговых электродвигателей, так и при их изготовлении, испытаниях или хранении [8].

Применение данной модели и внедрение соответствующих технологий и методов могут значительно повысить надежность и долговечность ТЭД-локомотивов, а также снизить эксплуатационные расходы и повысить общую эффективность железнодорожного транспорта.

Описание математической модели

В рамках исследования рассмотрим двухкомпонентную систему, состоящую из медного проводника и материала изоляции, как показано на рис. 1. В данной системе наблюдается периодическое изменение температуры на ΔT . Аналогичные процессы происходят в системе, включающей материал изоляции и стальной сердечник, что позволяет рассматривать их совместно.

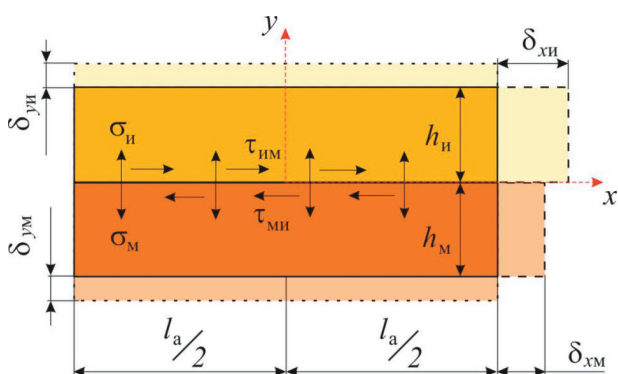


Рис. 1. Термомеханические напряжения и деформации при циклическом изменении температуры: σ_i — нормальное напряжение в изоляционном материале; σ_m — нормальное напряжение в медном проводнике; $\tau_{им}$ — касательное напряжение между изоляцией и медным проводником; $\tau_{ми}$ — касательное напряжение между медным проводником и изоляцией; h_i — толщина изоляции; h_m — толщина проводника; l_a — длина активной части обмотки; δ_{xi} — деформация материала изоляции по оси x ; δ_{xm} — деформация медного проводника по оси x ; δ_{yi} — деформация материала изоляции по оси y ; δ_{ym} — деформация медного проводника по оси y

Термические напряжения, возникающие как в медном проводнике, так и в стальном сердечнике, характеризуются незначительной величиной и не влияют на прочностные характеристики и долговечность тягового электродвигателя. В связи с этим сосредоточимся на детальном анализе напряженно-деформированного состояния исключительно материала изоляции.

Такой подход позволяет выделить и изучить ключевые факторы, влияющие на эксплуатационную надежность и долговечность системы, а также предоставляет более точные данные для проведения оценки и оптимизации конструкции тягового электродвигателя.

Для решения задачи необходимо установить два неизвестных межфазных напряжения в изоляционном материале (нормальное σ_i и касательное $\tau_{им}$) в таких условиях, чтобы перемещения нижней и верхней поверхностей его медного проводника совпадали.

В контексте циклической нагрузки в работе [8] представлены выражения для определения деформации материала как в продольном δ_{xm} , так и в поперечном δ_{yi} направлениях, что позволяет создать упрощенную модель:

$$\delta_{xi} = \frac{h_i K_i}{\mu_i} \tau_{им}, \quad \delta_{yi} = \frac{h_i H_i}{\nu_i} \sigma_i, \quad (1)$$

где h_i — толщина изоляции, м;
 μ_i — модуль сдвига изоляции, Па;
 ν_i, ν_m — коэффициент Пуассона изоляции и меди соответственно;
 K_i и H_i — постоянные коэффициенты.

В [9] утверждается, что при циклическом нагружении продольное межфазное смещение в конкретной точке определяется не только значением межфазного касательного напряжения сдвига, но и его второй производной в данной точке:

$$\delta_{xi} = \frac{h_i K_i}{\mu_i} \left[\tau_{им} - \alpha_{ци} \frac{d^2 \tau_{им}}{dx^2} \right], \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{ци}}$ — положительное число. Например, $\alpha_{\text{ци}} = h_{\text{и}}^2/3$ при $\mu_{\text{и}} = 0,3-0,35$ мПа.

Теперь выведем уравнения для межфазных касательных $\tau_{\text{им}}$ и нормальных $\sigma_{\text{им}}$ напряжений.

Так как температурные деформации материала изоляции в вертикальном направлении (ось y) δ_{yi} и медного проводника δ_{ym} по высоте паза относительно малы, будем считать, что:

$$\delta_{\text{yi}} = \delta_{\text{ym}}. \quad (3)$$

Равновесие изгибающих моментов, возникающих в материале изоляции ($J_{\text{и}}$) и медном проводнике ($J_{\text{м}}$), определится из следующих соотношений [10]:

$$J_{\text{и}} \frac{d^2 \delta_{\text{yi}}}{dx^2} - \frac{h_{\text{и}}}{2} \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \tau_{\text{им}} dx + \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \sigma_{\text{и}} dx dx = 0; \quad (4)$$

$$J_{\text{м}} \frac{d^2 \delta_{\text{ym}}}{dx^2} - \frac{h_{\text{м}}}{2} \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \tau_{\text{им}} dx - \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \int_{-l_{\text{а}}/2}^x \sigma_{\text{м}} dx dx = 0,$$

где $J_{\text{и}} = \frac{E_{\text{и}} h_{\text{и}}^3}{12(1-\nu_{\text{и}}^2)}$ — приведенный момент

сечения изоляции, м⁴;

$t_i = \max \left(\frac{l_k^i}{\mathbf{v}_k} + \tau_k^i \right)$ — приведенный мо-

мент сечения проводника, м⁴;

$E_{\text{и}}, E_{\text{м}}$ — модуль упругости изоляции и меди соответственно, Па.

Для исключения интегралов из (4) продифференцируем его дважды:

$$\begin{aligned} J_{\text{и}} \frac{d^4 \delta_{\text{yi}}}{dx^4} - \frac{h_{\text{и}}}{2} \frac{d\tau_{\text{им}}}{dx} + \sigma_{\text{и}} &= 0, \\ J_{\text{м}} \frac{d^4 \delta_{\text{ym}}}{dx^4} - \frac{h_{\text{м}}}{2} \frac{d\tau_{\text{им}}}{dx} - \sigma_{\text{м}} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Продольное смещение, возникающее под действием касательных напряжений в материале изоляции при условии незначительного влияния нормальных напряжений, то есть $\sigma_{\text{и}} = \sigma_{\text{м}} = 0$, может быть рассчитано с использованием следующего выражения:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{xi}} &= \alpha_{\text{и}} \Delta T + \lambda_{\text{и}} \frac{d\tau_{\text{им}}}{dx} + \frac{h_{\text{и}}}{2} \delta_{\text{yi}} - \\ &- \frac{h_{\text{и}}}{\mu_{\text{и}}} K_{\text{и}} \left[\tau_{\text{им}} - e_{\text{и}} \frac{d^2 \tau_{\text{им}}}{dx^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

и аналогично медного проводника:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{xm}} &= \alpha_{\text{м}} \Delta T + \lambda_{\text{м}} \frac{d\tau_{\text{им}}}{dx} + \frac{h_{\text{м}}}{2} \delta_{\text{ym}} - \\ &- \frac{h_{\text{м}}}{\mu_{\text{м}}} K_{\text{м}} \left[\tau_{\text{им}} - e_{\text{м}} \frac{d^2 \tau_{\text{им}}}{dx^2} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{и}} = \frac{1-\nu_{\text{и}}^2}{h_{\text{и}} E_{\text{и}}}$ — постоянный коэффициент

для материала изоляции;

$\lambda_{\text{м}} = \frac{1-\nu_{\text{м}}^2}{h_{\text{м}} E_{\text{м}}}$ — постоянный коэффициент

для меди;

$e_{\text{и}}, e_{\text{м}}$ — податливость изоляции и меди соответственно, м/Па;

$\alpha_{\text{и}}, \alpha_{\text{м}}$ — коэффициенты теплового расширения изоляции и медного проводника, 1/°С.

В правой части уравнений (6) и (7) первые слагаемые описывают деформацию, обусловленную тепловым расширением. Вторые слагаемые связаны с деформацией от действия продольной силы. Третьи слагаемые соответствуют деформации, вызванной изгибом. Четвертые слагаемые представляют собой коррекцию деформации, обусловленную циклическим характером нагрузки.

В итоге получим следующее дифференциальное уравнение четвертого порядка для межфазного касательного напряжения сдвига:

$$\begin{aligned} (\alpha_{\text{м}} - \alpha_{\text{и}}) \Delta T &= \left(\frac{h_{\text{и}}}{\mu_{\text{и}}} K_{\text{и}} + \frac{h_{\text{м}}}{\mu_{\text{м}}} K_{\text{м}} \right) \frac{d^2 \tau_{\text{им}}}{dx^2} - \\ &- \left(\frac{h_{\text{и}}}{\mu_{\text{и}}} K_{\text{и}} e_{\text{и}} + \frac{h_{\text{м}}}{\mu_{\text{м}}} K_{\text{м}} e_{\text{м}} \right) \frac{d^4 \tau_{\text{им}}}{dx^4}, \end{aligned} \quad (8)$$

где K_i — постоянный коэффициент,

$\mu_{и}, \mu_{м}$ — модули сдвига изоляции и медного проводника, Па.

С учетом граничных условий при $\tau_{им}(l_a/2) = 0$ можно записать:

$$\bar{\alpha}_{ц} \Delta T = A_{ц} \frac{d^2 \tau_{им}}{dx^2} - B_{ц} \frac{d^4 \tau_{им}}{dx^2}, \quad (9)$$

где

$$\bar{\alpha}_{ц} = \frac{\alpha_{м} - \alpha_{и}}{\left[(\lambda_{и} + \lambda_{м}) + \frac{\left(\frac{h_{и}}{2} + \frac{h_{м}}{2} \right)^2}{J_{м} + J_{и}} \right]}$$

— приведенный коэффициент теплового расширения изоляции, $1/^\circ\text{C}$

$$A_{ц} = \frac{\frac{h_{и}}{\mu_{и}} K_{и} + \frac{h_{м}}{\mu_{м}} K_{м}}{\left[(\lambda_{и} + \lambda_{м}) + \frac{\left(\frac{h_{и}}{2} + \frac{h_{м}}{2} \right)^2}{J_{м} + J_{и}} \right]}$$

$$B_{ц} = \frac{\frac{h_{и}^3}{\mu_{и}} K_{и} d_{и} + \frac{h_{м}^3}{\mu_{м}} K_{м} d_{м}}{\left[(\lambda_{и} + \lambda_{м}) + \frac{\left(\frac{h_{и}}{2} + \frac{h_{м}}{2} \right)^2}{J_{м} + J_{и}} \right]}$$

Общее решение (9) представляет собой линейную комбинацию произведений $\sinh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x)$, $\sinh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x)$, $\cosh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x)$, $\cosh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x)$ [9],

где

$$\rho_1^2 = \frac{A_{ц}}{4B_{ц}} + \frac{1}{2\sqrt{B_{ц}}}; \quad \rho_2^2 = \frac{2\sqrt{B_{ц}} - A_{ц}}{4B_{ц}}.$$

Решение уравнения (9) с учетом ограничений может быть получено следующим образом [10]:

$$\tau_{им} = C_1 \sinh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x) + C_2 \cosh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x), \quad (10)$$

где

$$C_1 = \frac{\alpha \Delta T \cosh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x)}{O_u};$$

$$C_2 = \frac{-\alpha \Delta T \sinh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x)}{O_u};$$

$$O_u = \rho_1 \sqrt{B_u} \sin(\rho_2 x) \cos(\rho_2 x) + \rho_2 \sqrt{B_u} \sinh(\rho_1 x) \cosh(\rho_1 x).$$

Описание касательных напряжений сдвига $\tau_{им}$, возникающих на границе раздела материалов, возможно при помощи формулы (11), которая является результатом решения уравнения (9):

$$\tau_{им} = \bar{\alpha}_{ц} \Delta T \left[\frac{\cosh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x) \sinh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x)}{O_u} - \frac{\sinh(\rho_1 x) \cos(\rho_2 x) \cosh(\rho_1 x) \sin(\rho_2 x)}{O_u} \right]. \quad (11)$$

Данная формула позволяет точно и эффективно рассчитывать касательные напряжения сдвига $\tau_{им}$, что является важным аспектом в контексте нашей работы.

Тепловое напряжение в соединительном слое определяется разницей коэффициентов теплового расширения между слоями и изменением температуры. Контрольной точкой для изменения температуры является момент, когда материал не испытывает напряжений сжатия. Тепловое напряжение возрастает при увеличении толщины либо модуля упругости медного проводника и изоляции. При уменьшении толщины соединительного слоя оно снижается.

В частности, максимальное касательное напряжение межфазного сдвига $\tau_{им\max}$ достигается в точке $x = l_a/2$. Предлагаемую модель можно рассматривать как имеющую фиксированное граничное условие по краям в осевом направлении.

Результаты вычислений

В рамках данного аналитического исследования была создана конечно-элементная модель в программном пакете SolidWorks, которая позволяет оценить касательные напряжения, возникающие в обмотке ТЭД локомотива.

Результаты моделирования касательных напряжений при изменении температуры $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ показаны на рис. 2. В отличие от механической усталости, температурный диапазон ΔT , который используется как независимая переменная, варьируется в зависимости от полигона эксплуатации локомотивов на железных дорогах РФ. Но не только температурный диапазон ΔT имеет решающее значение при оценке работоспособности материалов изоляции ТЭД, также большое влияние оказывает тепловой цикл в реальном времени.

В процессе исследования моделей, подверженных сжимающим и сдвигающим нагрузкам, было установлено, что разрушение образцов будет происходить не по центру, а в области, где наблюдается локальная концентрация напряжений сдвига. Около 60% ма-

териала изоляции в середине паза не подвергается термическому напряжению. Воздействию тепловой нагрузки подвержен только участок шириной 60–80 мм с каждой наружной стороны обмотки. Наиболее критическими для изоляции являются изгибающие напряжения, возникающие в лобовой части обмотки. Они могут привести к остаточным деформациям и повреждениям в местах выхода проводников из пазов.

Даже если уровень напряжений в материале изоляции значительно ниже предела упругости, в условиях непрерывного циклического нагружения возникают микроскопические повреждения. Эти микроразрушения накапливаются по всему объему материала изоляции и могут завершиться образованием трещин и их последующим ростом до размеров, вызывающих окончательное его разрушение после определенного количества циклов напряжений или деформаций, и инициировать крупномасштабные повреждения, приводящие к окончательному выходу ТЭД из строя. Проявление усталостного разрушения материала изоляции

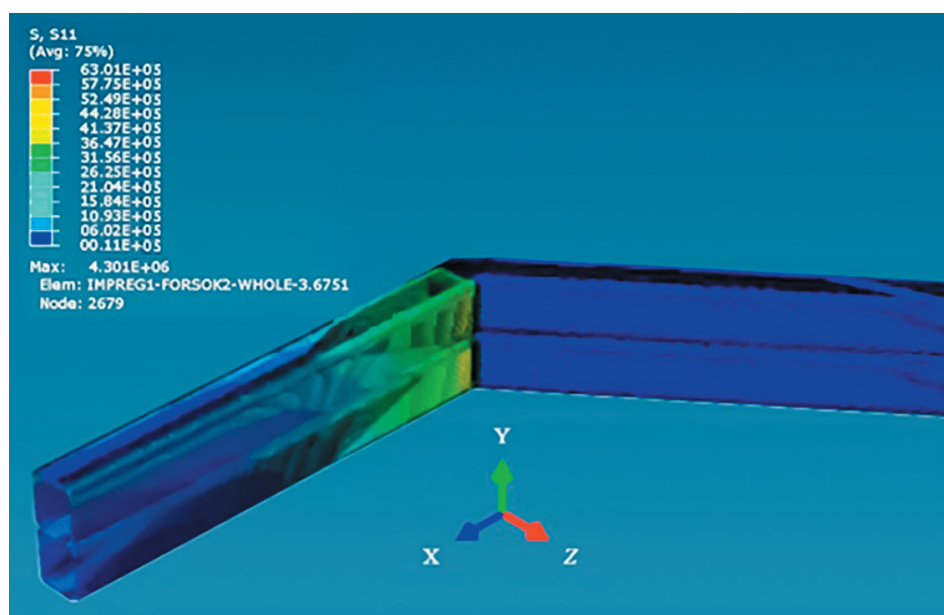


Рис. 2. Результаты моделирования касательных напряжений вдоль оси паза ТЭД

ТЭД часто происходит внезапно, без внешнего предупреждения. Однако вовлеченные механизмы разрушения материала изоляции ТЭД и подготовка условий для отказа могли скрытно работать с самого начала периода эксплуатации. Процесс накопления сопутствующих отказу показателей происходит преимущественно в определенных локальных областях материала изоляции ТЭД и неоднородно по всему ее объему. Эти уязвимые области могут иметь высокие локальные концентрации деформаций или напряжений, вызванные резкими изменениями геометрии обмотки, несовершенством материала изоляции или особыми условиями эксплуатации ТЭД.

Также с использованием аналитической модели был выполнен расчет максимального касательного напряжения сдвига по выражению (11). Результаты данного расчета приведены на рис. 3.

Результаты вычислений на основе выражения (11) показывают, что максимальные касательные напряжения $\tau_{\text{иммакс}}$ прямо пропорциональны разнице между коэффициентами

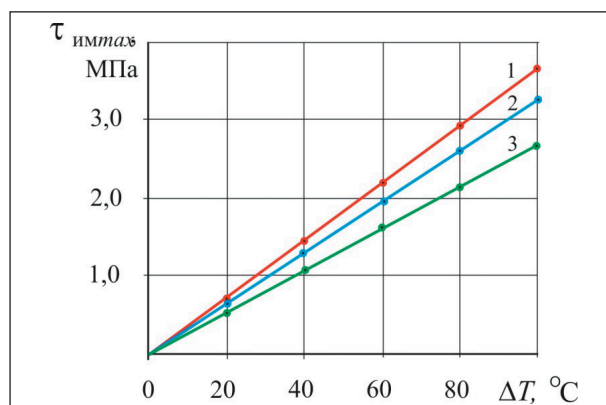


Рис. 3. Зависимость изменения максимального касательного напряжения в материале изоляции от изменения температуры ΔT при различных значениях модуля упругости изоляции: 1 — исходное состояние; 2 — уменьшено значение модуля упругости на 10%; 3 — уменьшено значение модуля упругости на 20%

теплового расширения для двух смежных слоев ($\alpha_{\text{и}} - \alpha_{\text{м}}$), изменению температуры ΔT и модулю упругости материала изоляции $E_{\text{и}}$. Максимальная погрешность расчета составляет 5,6%.

Выводы

Выявление первопричин и понимание процесса старения и отказа изоляции — одна из важных предпосылок при разработке более надежной конструкции ТЭД. Другими словами, правильное определение первопричин старения изоляции может быть важным фактором, позволяющим проектировать высоконадежные и эффективные тяговые электрические машины. Кроме того, понимание механизмов разрушения изоляции позволит использовать различные подходы к мониторингу технического состояния, тем самым увеличивая точность количественной оценки надежности работы и срока службы ТЭД локомотивов. С инженерной точки зрения важно прогнозировать механические и немеханические напряжения, влияющие на возникновение и развитие повреждений в материале изоляции. В изоляции ТЭД как в многослойном полимерном композитном материале чаще всего напряжения возникают из-за несоответствия коэффициентов теплового расширения стали, меди и материала изоляции при изменении температуры обмотки, химической усадки пропиточного состава при его полимеризации и неравномерного отверждения, поглощения влаги.

Проведенное исследование подтверждает надежность и точность метода аналитических расчетов, а также эффективность использования программного обеспечения SolidWorks для моделирования механических напряжений в изоляции ТЭД.

Эти результаты могут быть полезны для дальнейшего анализа и разработки методов снижения напряжений в материале изоляции.

Список источников

1. Исмаилов Ш. К. Повышение ресурса изоляции электрических машин подвижного состава: монография. Омск, 2007. 391 с.

2. Шрайбер М. А. Конечно-элементное моделирование тепловых процессов асинхронного тягового электродвигателя // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: мат-лы I Международной научно-технической конференции (Ташкент, 20–23 апреля 2022 г.). Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет, 2022. С. 203–208.

3. Модель теплового потока обмотки статора асинхронного тягового электродвигателя / В. В. Грачев и др. // Электротехника. 2022. № 2. С. 36–39.

4. Грищенко А. В., Шрайбер М. А. Термомеханические напряжения в изоляции тяговых электрических машин тепловозов // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сб. ст. СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2021. С. 107–109.

5. Кьюнг Л. К., Лурье С. А., Дудченко А. А. Об оценке трещиностойкости при межслойном раз-

рушении слоистых композитов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18, № 1. 2012. С. 83–91.

6. Дудкин А. Н., Ким В. С., Марьин С. С. Исследование внутренних механических напряжений в пропиточных и заливочных лаках // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308, № 7. С. 171–174.

7. Suhir E. Stresses in Bi-Metal Thermostats // Journal of Applied Mechanics. 1986. No. 53 (3). P. 657–660.

8. Suhir E. Interfacial Stresses in Bimetal Thermostat // Journal of Applied Mechanics. 1989. No. 56 (3). Pp. 595–600.

9. Bert C. W. Bending of Plates on Thin Compressible Foundations // Journal of Applied Mechanics. 1994. No. 61 (2). Pp. 477–499.

Дата поступления: 11.11.2025

Решение о публикации: 23.02.2026

Контактная информация:

ШРАЙБЕР Марина Александровна — канд. техн. наук, доцент; goshapti4ka@yandex.ru

A model of thermal-mechanical stresses in the insulation-conductor zone of locomotive traction electric motors

M. A. Shrajber

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Shrajber M. A. A model of thermal-mechanical stresses in the insulation-conductor zone of locomotive traction electric motors // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 41–49. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-41-49. (In Russian)*

Abstract

Objective: to investigate the issue of enhancing the service life and reliability of locomotives' traction electric motors (TEM). To evaluate the effect of thermomechanical stress on lifespan of their insulation materials. **Methods:** the main methods of studying and calculating temperature fields are the theory of heat transfer in multilayer materials and the finite element method, implemented in the SolidWorks software package. **Results:** the research results have demonstrated that thermal-mechanical stresses play a significant role in the dynamic thermal aging of the TEM winding insulation system. A methodology for numerical

investigation of the stress-strain state of the TEM insulation material at various stages of static and cyclic loading has been developed. The study has established that the main factor determining the intensity of insulation aging is the influence of alternating cyclic thermomechanical stresses, rather than thermochemical degradation of the impregnation composition. Analytical expressions have been obtained to assess the stress-strain state of TEM insulation. These expressions vary in that they require comparatively less initial data and enable strength calculations that account for specific features of the electric drive system. An approximate predictive model has been developed to assess interfacial thermal stresses in the assembly of TEM slot-winding materials. The insulating material is assumed to behave as a linear-elastic medium at strain levels below the yield point. From a structural-analysis perspective, the bonded components can be modelled as elongated rectangular plates subjected to linear elastic deformations. **Practical significance:** the results of the analysis can be used to evaluate thermomechanical stresses in impregnation materials of traction motors and analogous systems. The developed techniques for assessing the stress state of TEM insulation can be recommended for practical application.

Keywords: locomotive's traction electric motor, thermal processes in electric machines, insulation aging, thermal-mechanical stresses, reliability of locomotive electric machines

References

1. Ismailov Sh.K. Povyshenie resursa izolyatsii elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava: monografiya. Omsk, 2007. 391 s. (In Russian)
2. Shrajber M.A. Konechno-elementnoe modelirovanie teplovykh protsessov asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya // Zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav: problemy, resheniya, perspektivy: mat-ly I Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Tashkent, 20–23 aprelya 2022 g.). Tashkent: Tashkentskij gosudarstvennyj transportnyj universitet, 2022. S. 203–208. (In Russian)
3. Model' teplovogo potoka obmotki statora asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya / V.V. Grachev i dr. // Elektrotehnika. 2022. No. 2. S. 36–39. ISSN 0013-5860. (In Russian)
4. Grishchenko A.V., Shrajber M.A. Termomekhanicheskie napryazheniya v izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin teplovozov // III Betankurovskij mezhdunarodnyj inzhenernyj forum: sb. st. SPb.: Peterburgskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2021. S. 107–109. (In Russian)
5. K'yung L.K., Lur'e S.A., Dudchenko A.A. Ob otsenke treshchinostojkosti pri mezhslonnom razrushenii sloistykh kompozitov // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksij. 2012. T. 18, no. 1. 2012. S. 83–91. (In Russian)
6. Dudkin A.N., Kim V.S., Mar'in S. S. Issledovanie vnutrennikh mekhanicheskikh napryazhenij v propitochnykh i zalivochnykh lakakh // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2005. T. 308, no. 7. S. 171–174. (In Russian)
7. Suhir E. Stresses in Bi-Metal Thermostats // Journal of Applied Mechanics. 1986. No. 53 (3). Pp. 657–660.
8. Suhir E. Interfacial Stresses in Bimetal Thermostat // Journal of Applied Mechanics. 1989. No. 56 (3). Pp. 595–600.
9. Bert C.W. Bending of Plates on Thin Compressible Foundations // Journal of Applied Mechanics. 1994. No. 61 (2). Pp. 477–499.

Received: 11.11.2025

Accepted: 23.02.2026

Author's information:

Marina A. SHRAJBER – PhD in Engineering,
Associate Professor;
goshapti4ka@yandex.ru