

УДК 621.313

Влияние термомеханической нагрузки на старение изоляции тяговых электродвигателей тепловозов

М. А. Шрайбер

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

Для цитирования: Шрайбер М. А. Влияние термомеханической нагрузки на старение изоляции тяговых электродвигателей тепловозов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 242–248. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-242-248

Аннотация

Цель: Рассмотреть задачу повышения надежности тяговых электрических машин. Выполнить оценку влияния термомеханических напряжений на срок службы изоляционного материала тяговых электродвигателей. **Методы:** Основным методом исследования и расчета температурных полей выбран метод конечных элементов, выполненный в программном пакете SolidWorks 2005. **Результаты:** Результаты показывают, что термомеханические напряжения играют значительную роль во время динамического термического старения системы изоляции обмотки статора. При динамическом изменении температуры изоляционная система испытывает повторяющиеся термомеханические нагрузки, поскольку коэффициенты теплового расширения изоляционных материалов и медных проводников различны. **Практическая значимость:** Выявлена необходимость дальнейшего изучения фактического теплового состояния электрических машин, которая позволит повысить точность определения температуры, предупредить возможный перегрев в эксплуатации, тем самым продлив ресурс тяговых двигателей, и снизить вероятность внезапных отказов. Разработанные методы определения теплового состояния электрических машин рекомендуются к практическому использованию.

Ключевые слова: Тяговый электродвигатель локомотива, тепловые процессы электрических машин.

Введение

До недавнего времени для ТЭД основным фактором, связанным с ухудшением состояния изоляции обмотки, считалось термическое окисление изоляционных материалов. Теперь выяснилось, что тепловая перегрузка вызывает также механическое напряжение в обмотках ТЭД, что

со временем может привести к усталости и ухудшению их характеристик.

Само по себе термомеханическое напряжение не является новым предметом изучения. Можно найти несколько исследований, сообщающих о механическом напряжении термического происхождения. Деформация паяных соединений в

результате напряжения, вызванного несоответствием коэффициентов теплового расширения, рассмотрена в [1]. Согласно ему, несоответствие коэффициента теплового расширения может вызвать механическое напряжение в электронных узлах не только из-за циклического изменения температуры во время нормальной работы, но также из-за высоких температур, возникающих во время изготовления, транспортировки и хранения.

В [2] авторы проанализировали термические напряжения в двухфазных композитах как численно, так и аналитически. Моделирование повреждений и отказов модулей IGBT-транзисторов с учетом электрических, термических и механических напряжений было изучено в [3, 4]. Было обнаружено, что граница раздела связующий провод — подложка является наиболее уязвимой, поскольку больше всего подвержена термическому механическому напряжению. Из этого следует, что термомеханические напряжения широко изучались применительно к корпусам силовой электроники, слоистым и композитным материалам, а для тяговых электрических машин было обнаружено крайне мало публикаций [5].

Термомеханическое старение изоляции ТЭД

Изоляция тяговых электрических машин тепловоза — это композитный материал, состоящий из нескольких составляющих, которые сохраняют свои индивидуальные свойства, в отличие от материалов с однородной смесью, таких как сплавы. Они неоднородны (обычно двухфазные) и содержат один непрерывный материал (чаще всего стеклоткань), который пропитан наполнителем. Наполнители бывают разных видов — пропиточные лаки или компаунды для повышения электрической и механической прочности, а также защиты обмоток ТЭД тепловоза от воздействия окружающей среды, например влаги и пыли.

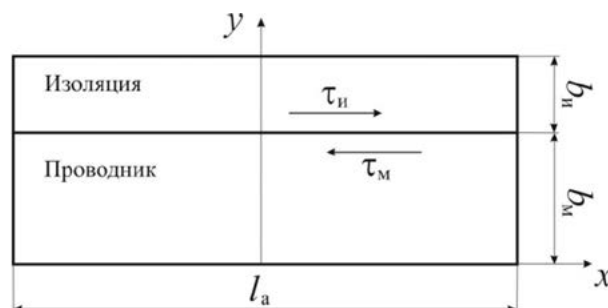


Рис. 1. Расчетная схема напряженного состояния на границе изоляции и медного проводника

Поскольку потеря энергии неизбежна во время работы ТЭД, температура обмотки повышается при увеличении нагрузки и снижается при ее уменьшении [6]. При изменении температуры электрическая изоляция подвергается не только термическому воздействию, но и термомеханическому напряжению, которое вызывается разными коэффициентами теплового расширения меди проводников и изоляционного материала. Механические напряжения, особенно касательные напряжения, возникающие на границах раздела между медным проводником и изоляционным материалом, вызывают появление внутренних трещин и его расслоение (рис. 1).

Расслоение вызывает образование воздушных полостей, которые ухудшают передачу теплоты от медного проводника к сердечнику статора, делая обмотки более восприимчивыми к перегреву. Впоследствии, когда материал изоляции не может выдержать определенный уровень тепловой или механической нагрузки, ТЭД выходит из строя.

Как упоминалось выше, термомеханическое напряжение вызывается разностью коэффициентов теплового расширения связанных слоев. Как показано на рис. 1, возникающее касательное напряжение в середине паза при $l_a/2$ равно нулю. Напряжение постепенно увеличивается по длине медного проводника и достигает своего максимума на свободном конце активной части обмотки при выходе из паза. Результирующее касательное напряжение в соединительном слое

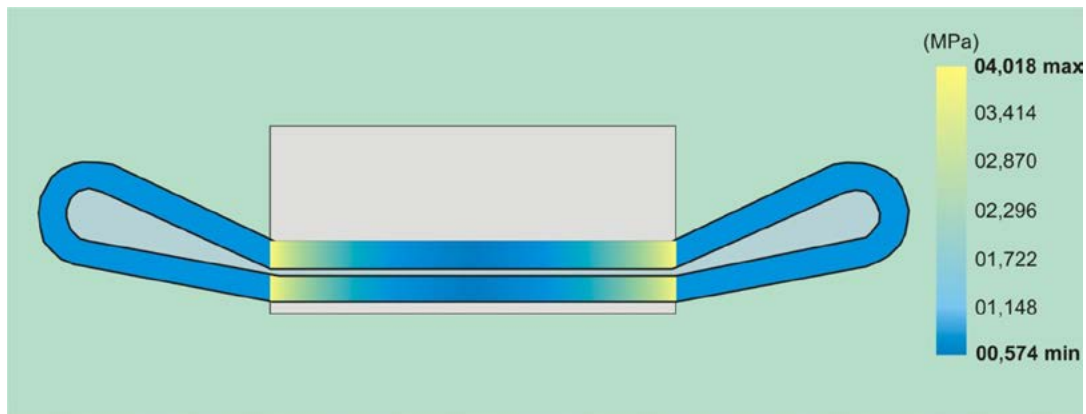


Рис. 2. Результат моделирования касательных напряжений в изоляции обмотки асинхронного ТЭД

из-за изменения температуры ΔT может быть выражено как [7]:

$$\tau = \frac{(\alpha_{и} - \alpha_{м})G_{и}\Delta T \sin h(\beta x)}{\beta b_{и} \cos h(\beta l_a / 2)}; \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{G_{и}}{b_{и}}} \left(\frac{1}{E_{м} b_{м}} \right), \quad (2)$$

где $E_{м}$ — модуль упругости медного проводника обмотки статора, Па; $G_{и}$ — модуль сдвига материала изоляции, Па; $\alpha_{и}$, $\alpha_{м}$ — коэффициенты теплового расширения материала изоляции и медного проводника обмотки статора соответственно, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; l_a — длина активной части обмотки статора, м; $b_{и}$, $b_{м}$ — толщина изоляции и медного проводника обмотки статора соответственно, м.

Согласно [7], наведенное касательное напряжение достигает максимума в каждом из концов активной длины обмотки статора при $l_a/2$, что выражается следующим образом:

$$\tau_{\max} = \frac{(\alpha_{и} - \alpha_{м})G_{и}\Delta T \operatorname{tg} h(\beta l_a / 2)}{\beta b_{и}}. \quad (3)$$

Обычно достаточно предположить, что $\operatorname{tg} h(\beta l_a) \approx 1$, таким образом, максимальное

напряжение сдвига τ_{\max} возникает на конце склеенных слоев, при этом оно не зависит от общей длины l_a , как выражено в [7]:

$$\tau_{\max} = \frac{(\alpha_{и} - \alpha_{м})G_{и}\Delta T}{\beta b_{и}}. \quad (4)$$

Анализ термомеханического касательного напряжения в материале изоляции статорной обмотки ТЭД при $\Delta T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ проводился методом конечных элементов в программном комплексе SolidWorks. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

На рис. 3 показана зависимость изменения касательного напряжения в материале изоляции вдоль паза, построенная по результатам моделирования и расчета по уравнению (4).

Как и следовало ожидать, максимальное касательное напряжение возникает на конце активной части обмотки и составляет 3,83 мПа. Кроме того, следует отметить, что уравнение (4) дает очень точную оценку (минимальная погрешность моделирования и аналитического расчета не превышает 1,5 %) касательного напряжения в материале изоляции.

Из данных моделирования и расчета видно, что максимальные касательные напряжения намного меньше, чем предел прочности материала на рас-

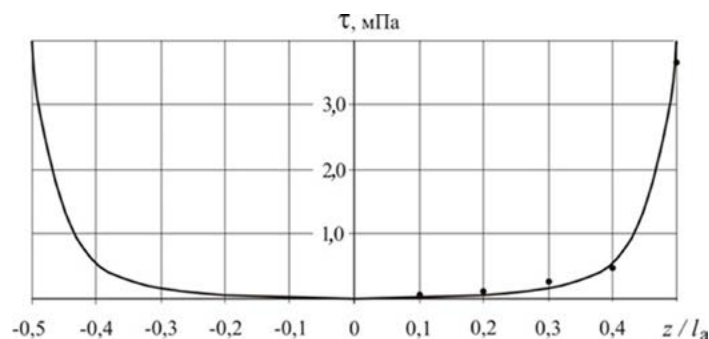


Рис. 3. Распределение касательных напряжений по длине паза асинхронного ТЭД:
 ● — данные расчета, — — результаты моделирования в среде SolidWorks

тяжение и предел текучести. Однако материал изоляции подвергается многократной загрузке и разгрузке, вызывает усталость. Даже в области упругой деформации локальная деформация накапливается и в конечном итоге вызывает усталостное разрушение материала изоляции после достаточного количества циклов. Следует отметить, что понятие «усталость» обычно связывают с металлами или их сплавами, но она может возникать во всех материалах, способных к пластической деформации. Сюда входят полимеры и композиционные материалы.

Усталостное разрушение может быть определено как процесс, при котором происходят прогрессирующие, локальные и постоянные микроструктурные изменения в материале изоляции ТЭД тепловозов, когда она подвергается воздействию усилий, вызывающих знакопеременные напряжения и деформации в некоторой точке или нескольких точках. Эти микроструктурные изменения могут завершиться образованием трещин и их последующим ростом до размеров, вызывающих окончательное разрушение материала изоляции после определенного количества циклов напряжений или деформаций.

Прилагательное «прогрессивный» подразумевает, что процесс утомления материала изоляции ТЭД происходит в течение определенного периода времени нагрузки или эксплуатации. Воз-

никновение усталостного разрушения материала изоляции ТЭД часто происходит очень внезапно, без внешнего предупреждения. Однако вовлеченные механизмы разрушения изоляции ТЭД могли скрытно работать с самого начала времени эксплуатации локомотива.

Прилагательное «локализованный» подразумевает, что процесс усталостного разрушения происходит преимущественно в определенных локальных областях материала изоляции ТЭД и неоднородно по всему ее объему. Эти уязвимые области могут иметь высокие локальные концентрации деформаций и напряжений, вызванные резкими изменениями геометрии или несовершенством материала изоляции ТЭД.

Фраза «постоянные микроструктурные изменения» подчеркивает центральную роль циклических пластических деформаций в возникновении необратимых изменений в структуре изоляции ТЭД. Многочисленными исследованиями установлено, что усталость в каждом случае является результатом циклической пластической деформации [8]. Небольшая пластическая деформация, примененная только один раз, не вызывает каких-либо существенных изменений в структуре материала изоляции ТЭД, но многократное повторение очень малых пластических деформаций приводит к кумулятивному повреждению, заканчивающемуся усталостным ее разрушением.

Представленная конечно-элементная модель обеспечивает оценку термомеханического напряжения при определенных динамических тепловых условиях процесса работы материала изоляции. Кроме того, с помощью данной модели получена значимость сопутствующего термомеханического старения материала изоляции. Для точной оценки срока службы в отношении термомеханического старения изоляционного материала требуются дополнительные исследования по определению его характеристик.

Согласно модели Дакина [9], время исправного функционирования L является функцией температуры T :

$$L = A \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (5)$$

где A и B — постоянные коэффициенты, которые определяются с помощью экспериментальных исследований.

Однако данная модель подходит для термомеханического старения материала изоляции при постоянной температуре, в то время как для динамической тепловой нагрузки, например в тяговых двигателях локомотивов, представленную модель необходимо модифицировать, поскольку температура меняется со временем. Предполагая, что скорость старения материала изоляции обратно пропорциональна сроку службы, а доля потерь в течение срока службы может быть выражена как функция температуры. Таким образом, когда температура зависит от времени, $T(t)$ для одного теплового цикла (L_{fc}) может быть вычислена с помощью выражения:

$$L_{fc} = \int_0^{\Delta t_c} \frac{1}{L_0} \exp\left[-B\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T(t)}\right)\right] dt, \quad (6)$$

где L_0 — срок службы материала изоляции при эталонной температуре T_0 , ч; t_c — период времени одного теплового цикла, ч.

Выводы

В настоящей работе выполнен расчет и моделирование процесса динамического нагружения изоляции ТЭД тепловозов. Для более точной оценки термомеханических напряжений в изоляционном материале по длине активной части обмотки выполнено моделирование касательных напряжений на границе между материалом изоляции и медным проводником. Циклические процессы в данной области приводят к расслоению материала изоляции, что, в свою очередь, ухудшает процесс передачи теплоты от медного проводника к сердечнику статора. Сравнивая данные моделирования и численно рассчитанные результаты, можно сделать вывод, что термомеханическое старение играет важную роль в динамическом термическом процессе работы тяговых электрических машин тепловозов и оказывает существенное влияние на их срок службы.

Библиографический список

1. Pan T.-Y. Thermal cycling induced plastic deformation in solder joints — Part II: Accumulated deformation in through hole joints / T.-Y. Pan // IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol. — 1991. — № 14. — Pp. 824–832.
2. Li W. Thermal-mechanical failure and life analysis on CBGA package used for great scale FPGA chip / W. Li, X. Zhang // Proceedings of the International Conference on Electronic Packaging Technology High Density Packaging. — Beijing, China, 10–13 August 2009.
3. Yuan Q. Failure mode verification of power IGBT under different thermal stress application conditions in power cycling test environment / Q. Yuan, R. Endoh, T. Ima // Proceedings of the International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC). — Mie, Japan, 17–21 April 2018. — Pp. 367–370.
4. Pedersen K. B. Dynamic modeling method of electrothermo-mechanical degradation in IGBT modules / K. B. Pedersen, K. Pedersen // IEEE Trans. Power Electron. — 2016. — № 31. — Pp. 975–986.
5. Грищенко А. В. Термомеханические напряжения в изоляции тяговых электрических машин тепловозов /

А. В. Грищенко, М. А. Шрайбер // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов в двух томах. — СПб. — 2021. — С. 107–109.

6. Грищенко А. В. Экспериментальные исследования теплового состояния коллектора ТЭД / А. В. Грищенко, В. В. Грачев, Ф. Ю. Базилевский, М. А. Шрайбер // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век: сборник материалов VI Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС А. В. Плакса. — 2018. — С. 124–129.

7. Chen W. Thermal stress in bonded joints / W. Chen, C. Nelson // IBM Journal of Research and Development. — 1979. — Vol. 23. — № 2. — Pp. 179–188.

8. Voitto I. J. Kokko. Ageing Due to Thermal Cycling by Start and Stop Cycles in Lifetime Estimation of Hydroelectric Generator Stator Windings / Voitto I. J. Kokko // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). — 2011.

9. Dakin T. W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon / T. W. Dakin // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. — 1998. — Vol. 67. — № 1. — Pp. 113–122.

Дата поступления: 15.03.2022

Решение о публикации: 05.05.2022

Контактная информация:

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

Influence of Thermomechanical Workload on the Aging of Insulation of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives

M. A. Shreiber

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

For citation: Shraiber M. A. Influence of Thermomechanical Workload on the Aging of Insulation of Traction Motors of Diesel Locomotives // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 242–248. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-242-248

Summary

Purpose: To consider the problem of increasing the reliability of traction electric machines. To assess the effect of thermomechanical stresses on the service lifetime of insulating material of traction electric motors. **Methods:** Finite element method, implemented in SolidWorks 2005 software package, was chosen as the main method for studying and calculating temperature fields. **Results:** The results show that thermomechanical stresses play a significant role during dynamic thermal aging of stator winding insulation system. With dynamic temperature changes, an insulation system experiences repeated thermomechanical stresses since the coefficients of thermal expansion of insulating materials and copper conductors are different. **Practical importance:** The need for further study of the actual thermal state of electrical machines has been identified which will allow to a rise temperature definition accuracy, to give a warning for possible overheating in operation by that extending traction motor lifetime and reducing sudden failure likelihood. The developed methods for determining electrical machine thermal state are recommended for practical use.

Keywords: Locomotive traction motor, thermal processes of electrical machines.

References

1. Pan T.-Y. Thermal cycling induced plastic deformation in solder joints. Part II: Accumulated deformation in through hole joints. IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol. 1991, 14, pp. 824–832.
2. Li W., Zhang X. Thermal-mechanical failure and life analysis on CBGA package used for great scale FPGA chip. In Proceedings of the International Conference on Electronic Packaging Technology High Density Packaging, Beijing, China, August 10–13, 2009.
3. Yuan Q., Endoh R., Ima T., Kajita Y., Luo Y. Failure mode verification of power IGBT under different thermal stress application conditions in power cycling test environment. In Proceedings of the International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), Mie, Japan, April 17–21, 2018, pp. 367–370.
4. Pedersen K. B., Pedersen K. Dynamic modeling method of electro-thermo-mechanical degradation in IGBT modules. IEEE Trans. Power Electron. 2016, 31, pp. 975–986.
5. Grishchenko A. V., Shrayber M. A. Termomekhanicheskie napryazheniya v izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin teplovozov [Thermomechanical stresses in the insulation of traction electric machines of diesel locomotives]. *III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum* [III Betancourt International Engineering Forum]. St. Petersburg, 2021, pp. 107-109. (In Russian)
6. Grishchenko A. V., Grachev V. V., Bazilevskiy F. Yu., Shrayber M. A. Eksperimental'nye issledovaniya teplovogo sostoyaniya kollektora TED [Experimental studies of the thermal state of the TED collector]. *Lokomotivy. Elektricheskiy transport. XXI vek. Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya doktora tekhnicheskikh nauk, professora kafedry "Elektricheskaya tyaga" PGUPS A.V. Plaksa* [Locomotives. Electric transport. XXI Century. Collection of materials of the VI International Scientific and Technical Conference. dedicated to the 90th anniversary of the birth of Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Electric Traction" PGUPS A.V. Crybaby]. 2018, pp. 124-129. (In Russian)
7. Chen W., Nelson C., Thermal stress in bonded joints, IBM Journal of Research and Development. 1979, vol. 23, I. 2, pp. 179-188.
8. Voitto I. J. Kokko, Ageing Due to Thermal Cycling by Start and Stop Cycles in Lifetime Estimation of Hydroelectric Generator Stator Windings, IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011.
9. Dakin T. W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1998, vol. 67, I. 1, pp. 113-122.

Received: March 15, 2022

Accepted: May 05, 2022

Author's information:

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