

МОДЕЛЬ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ИЗОЛЯЦИИ ТЭД ТЕПЛОВЗОВ

А. В. ГРИЩЕНКО, М. А. ШРАЙБЕР

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
Российская Федерация*

В процессе работы тяговые электрические машины тепловозов подвергаются комплексу механических, электрических и тепловых нагрузок в зависимости от условий движения, что вызывает ускоренное старение электрической изоляции.

Среди всех вышеупомянутых нагрузок термомеханическое напряжение считается одним из наиболее критичных для тяговых электрических машин, поскольку их конструкция всегда проектируется с учетом предела тепловых возможностей. Установлено, что старение изоляции тяговых электрических машин тепловозов, подверженных воздействию внешних факторов, вызвано циклическим тепловым расширением материалов, из которых изготовлена электрическая машина. Термомеханическое напряжение с точки зрения изменения температуры очень динамично, включает в себя различные уровни средней температуры и спектр температурных циклов.

Ускоренное старение изоляции происходит не только из-за ускоренного термического окисления полимеров, но и из-за разных коэффициентов теплового расширения и различного распределения температуры между пропиточным составом, изоляционным материалом, медью обмотки и сталью сердечника. Это способствует появлению дополнительных термомеханических напряжений в элементах обмотки и изоляции. Если термомеханическое напряжение достигает предела текучести или предельного напряжения растяжения изоляции, происходит разрушение материала.

Термомеханическое напряжение из-за разницы между коэффициентами теплового расширения и сроком службы широко изучается во многих областях и приложениях. Например, в [1] обсуждается влияние термомеханических напряжений на IGBT-транзистор с изолированным затвором. Все эти исследования являются ценными исходными данными для оценки термического механического напряжения и вызванного им срока службы. Одна из причин заключается в том, что термомеханические нагрузки менее сильны, когда электрические машины работают с постоянной нагрузкой для промышленного использования, чем циклические нагрузки, которым подвержены тяговые электродвигатели тепловозов.

Точные значения допустимых температур нагрева обмоток и стали для тяговых электродвигателей тепловозов при продолжительной их работе с номинальной нагрузкой устанавливаются по результатам эксплуатационных испытаний. Показано, что для поездного тепловоза в зависимости от класса изоляции температура обмоток 6–9 раз за сутки изменяется от уровня окружающей среды до 120–160 °С.

В одной тяговой электрической машине чаще всего используется более одного изоляционного материала, а комбинация изоляционных материалов составляет систему электрической изоляции. Эти комбинации различаются в зависимости от требований к электрической, термической и механической прочности изоляции.

Изоляция электрических машин – 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 тяговой электрической машины тепловоза от воздействия окружающей среды, например, влаги и пыли. В результате мы получаем новые свойства изоляционного материала, отличные от свойств его составляющих. Например, армированный бетон – композитный материал, в котором изначально низкая прочность бетона на растяжение улучшается за счет включения арматуры, выдерживающей основную тяжесть приложенных растягивающих усилий благодаря своей высокой жесткости.

В процессе нагревания тяговой электрической машины происходит естественный процесс объемного расширения меди обмотки, стали сердечника и изоляционного материала. С учетом различных коэффициентов объемного расширения указанных материалов со стороны сердечника на изоляцию действует сила F_c , а со стороны меди – сила F_m . Так как изоляционный материал является наименее слабым звеном между сердечником и проводником, тепловая деформация стали сердечника δ_{lc} и меди обмотки δ_{tm} происходит за счет уменьшения объема, занимаемого изоляционным материалом. В изоляционном материале возникают дополнительные термомеханические напряжения.

Термомеханические напряжения и, связанное с ними старение материалов исследуются во многих отраслях производства, в том числе на железнодорожном транспорте. Ранее считалось, что лак, используемый для пропитки изоляции, имеет сходный коэффициент теплового расширения с материалом проводников [2]. Однако с развитием технологии материалов, которая обеспечивает электрической машине высокую удельную мощность и улучшенные характеристики теплопередачи, проблема термомеханического напряжения, вызванного тепловым расширением, требует подробного исследования разработчиками тяговых электрических машин.

Изменение температуры объекта соответствует изменению его размеров. Если температура объекта равномерно распределена, материал будет подвергаться равномерной тепловой деформации δ_t , которая может быть выражена уравнением:

$$\delta_t = \alpha_v \Delta T, \quad (1)$$

где α_v – коэффициент объемного расширения, $1/^\circ\text{C}$; ΔT – разница температуры, $^\circ\text{C}$.

Если соединить материалы с разными коэффициентами объемного расширения (например, медный проводник, покрытый пропитанной лаком изоляцией), то возникнет термомеханическое напряжение, даже если все материалы нагреваются равномерно.

В многослойных изоляционных материалах характер повреждения заметно различается в зависимости от локального состояния напряжения относительно ориентации каждого из слоев изоляции [3]. В многослойных изоляционных материалах повреждение инициируется в нескольких местах одновременно по всему периметру, либо внутри слоя изоляционного материала, либо на границе раздела «волокно – металл». С каждым новым циклом прохождения эти участки повреждения расширяются и в конечном итоге сливаются во внутрислойные трещины, которые распространяются исключительно вдоль направления волокон изоляционного материала. Трещины в слое изоляции обычно проходят по всей ширине проводника (особенно в хрупких терморезистивных пропиточных композитах) и охватывают всю толщину слоя, так как их рост вне плоскости задерживается ориентацией поверхности материала в соседних слоях [4].

В зависимости от состояния напряжения в каждом слое количество трещин в изоляционном материале может различаться. Повреждение может проявляться в виде одной доминирующей трещины в одном слое, множественных трещин в одном слое или множественных трещин в нескольких слоях. Когда трещины заканчиваются на краю слоя, дальнейшее нагружение может вызвать расслоение трещины – крупномасштабный механизм критического повреждения, который включает разделение соседних слоев.

Когда слой растрескивается, местные напряжения в области вокруг трещины уменьшаются, и нагрузки передаются на соседние слои. По мере того, как слои растрескиваются, трещины начинают взаимодействовать, создавая области, которые могут выдерживать только самые минимальные нагрузки.

С одной стороны, наличие трещины в изоляционном материале кажется не критичным, но ее заполнение атмосферной влагой или продуктами износа ТЭД приводит к критическому отказу материала.

Список литературы

1 Increasing the cooling efficiency of power semiconductor devices / A. V. Grishchenko [et al.] // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87, no. 5. – P. 266–269. – <https://doi.org/10.3103/S1068371216050084>.

2 A method of using neural fuzzy models to determine the technical state of a diesel locomotive's electrical equipment / A. V. Agunov [et al.] // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 88. – P. 634–638. – <https://doi.org/10.3103/S1068371217100029>.

3 Size effects in a shape memory alloy rod caused by inhomogeneity of temperature and stress fields studied through solving of a 1d connected thermal and mechanical problem // A. E. Volkov [et al.] // 8th Conference on Smart Structures and Materials, SMART 2017 and 6th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering. – 2017. – P. 1582–1589. – DOI: 10.1007/s40830-019-00226-5.

4 **Chen, W.** Thermal stress in bonded joints / W. Chen, C. Nelson // IBM Journal of Research and Development. – 1979. – Vol. 23, no. 2. – P. 179–188. – <https://doi.org/10.1016/j.ijlsolstr.2013.09.002>.