



# Прогнозирование надежности герметичных электромеханических преобразователей



Надежда КАРПОВА  
Nadezhda S. KARPOVA

Дмитрий ГОЛОКОЛОС  
Dmitry A. GOLOKOLOS



*Карпова Надежда Сергеевна – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения, Санкт-Петербург, Россия.*  
*Голоколос Дмитрий Анатольевич – аспирант кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, Комсомольск-на-Амуре, Россия.*

**Область применения герметичных электромеханических преобразователей ограничена ухудшением условий теплообмена между его активными элементами и внешней средой. Теория прочности определяет качественный характер влияния внешних факторов на надежность преобразователя. Для получения количественных характеристик проведены лабораторные испытания, в ходе которых были выявлены зависимости повреждаемости витковой и корпусной изоляции конструкции от влажности, вибрации и температуры в условиях эксплуатации транспортных и прочих устройств, рассчитанных на повышенные герметические свойства.**

*Ключевые слова:* герметичный электромеханический преобразователь, влажность, вибрация, температура, корпусная изоляция, витковая изоляция.

**Ц**елесообразность, а в ряде случаев и необходимость применения герметичных электромеханических преобразователей (ГЭМП) в первую очередь связаны с их стойкостью к основным внешним воздействиям – влажности и вибрации. Особенности конструкции и учет на стадии проектирования возможности использования ГЭМП в условиях повышенной влажности при одновременном наличии значительных вибрационных нагрузок делают их незаменимыми в насосных станциях с электрическим приводом, погруженном в воду энергетическом оборудовании, разнообразных транспортных устройствах.

Особый интерес к преобразователям герметичного исполнения как с практической, так и научной стороны связан с появлением новых композиционных материалов, обладающих уникальными физико-химическими свойствами, позволяющими не только обеспечить требования по надежности и экологичности, но и улучшить эксплуатационные характеристики оборудования. Капсулирование наиболее повреждаемых элементов обычных электромеханических преобразователей – многоступенчатых

ковых обмоток статора, полимерными терморезистивными связующими или использование дополнительных разделительных экранов в рабочем зазоре является технологической основой создания ГЭМП.

Однако переход к герметичной конструкции наряду с повышением влаго- и вибростойкости в то же время ведет к изменению условий теплообмена между активными элементами и внешней средой. Поэтому прогнозирование показателей надежности герметичных электромеханических преобразователей в условиях повышенной влажности и вибрационных нагрузок неразрывно сопряжено с учетом температуры в местах ее максимальной концентрации.

Основная задача герметизации — максимальное снижение влияния влажности на работоспособность электромеханических преобразователей. Воздействие влаги является ускоряющим фактором старения и разрушения изоляции статорных обмоток, приводящих примерно в 90% случаев к системным отказам.

Малая вязкость и другие свойства воды обуславливают ее высокую проникающую способность в изоляцию, причем особенно интенсивно этот процесс идет во время отключения преобразователей после работы в продолжительных тепловых режимах, ибо в этот период давление в порах и капиллярах электрической изоляции несколько ниже атмосферного. Проникая в технологические пустоты и трещины, влага создает проводящие мостики, приводит к снижению электрического сопротивления, потере электрической прочности и даже к пробое изоляции при включении. Под действием влаги происходит гидролитическое разрушение изоляционных материалов, заключающееся в расщеплении полимерных цепей. Периодическое проникновение и удаление влаги увеличивает пористость изоляции. По мере расслоения и разрыхления изоляции увеличивается ее гигроскопичность. Эти процессы развиваются параллельно с другими явлениями старения изоляции и взаимно стимулируют друг друга.

Еще одной задачей, решаемой при переходе к герметичному исполнению за счет капсулирования обмотки статора, становится повышение вибростойкости электро-

механических преобразователей, которые в процессе производства, транспортировки, эксплуатации подвергаются внешним по отношению к элементам обмоток механическим факторам.

Эти воздействия являются следствием механических и электромагнитных процессов. К первым относятся механическая неуравновешенность вращающихся частей, вызывающая повышенные вибрации с частотой вращения ротора и обусловленная такими причинами, как повышенная шероховатость поверхности трения качения или скольжения, неперпендикулярность по отношению к оси вала, износ посадочных поверхностей или их разрушение, некачественная центровка, слабое крепление вращающихся частей на валу, дефекты в передаточных устройствах, неправильная установка лабиринтных уплотнений за вал, недостаточная жесткость конструкции, колебания фундамента вследствие передачи вибраций через строительные связи, резонанс отдельных узлов при совпадении их собственной частоты с частотой вибрации ротора.

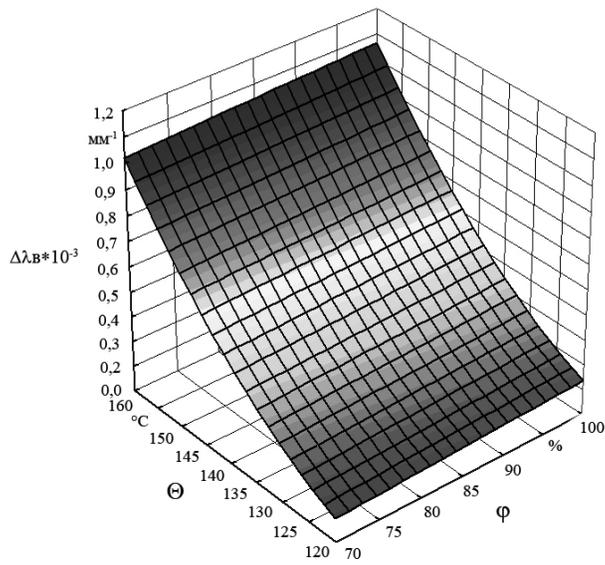
Вторая группа причин имеет электромагнитный характер. К вибрациям приводят все виды электромагнитных явлений, приводящие к нарушению симметрии магнитного поля в преобразователе: неправильное соединение обмоток статоров, короткие замыкания, обрыв стержней короткозамкнутых обмоток роторов, неравномерный воздушный зазор, ослабление активной стали, неправильное соотношение чисел зубцов статора и ротора, несимметричная нагрузка или питание преобразователей.

В большинстве случаев перечисленные причины приводят к циклическим, знакопеременным вибрациям. При переходных процессах, коротких замыканиях, амплитуды вибраций увеличиваются в десятки раз и оказывают существенное влияние на процесс разрушения изоляции. Следует отметить, что хотя в номинальных режимах работы амплитуда вибрации обычно незначительна и составляет порядка 10–100 мкм, но при количестве циклов за период эксплуатации порядка  $10^{10}$  эффективные вибрационные воздействия приводят к необратимым структурным изменениям в изоляционных материалах.



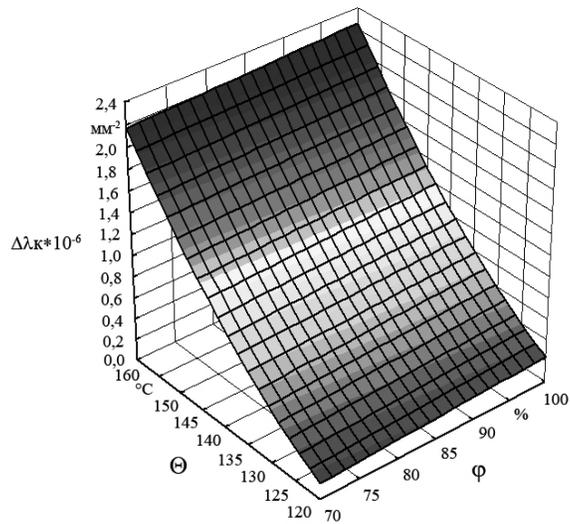
**Рис. 1. Зависимость повреждаемости витковой изоляции от температуры и влажности.**

*Pic. 1. Dependency of damaging of turn insulation on temperature and humidity.*



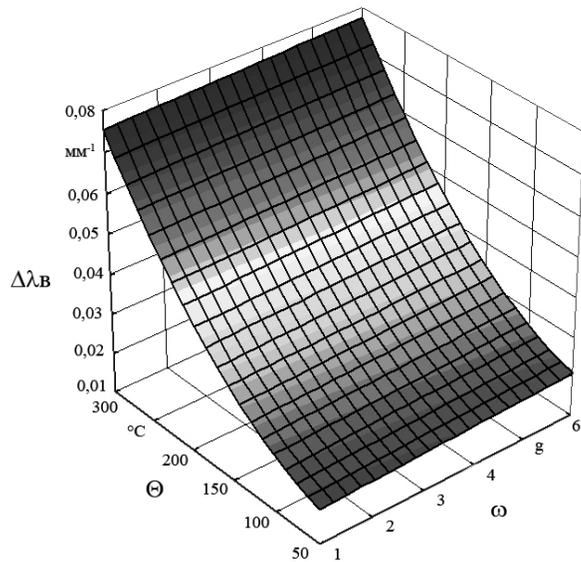
**Рис. 2. Зависимость повреждаемости корпусной изоляции от температуры и влажности.**

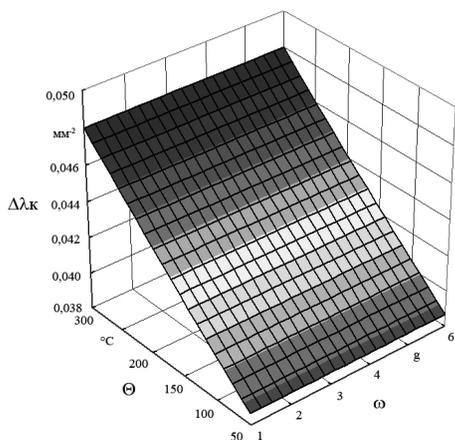
*Pic. 2. Dependency of damaging of major frame insulation on temperature and humidity.*



**Рис. 3. Зависимость повреждаемости витковой изоляции от температуры и вибрации.**

*Pic. 3. Dependency of damaging of turn insulation on temperature and vibration.*





**Рис. 4. Зависимость повреждаемости корпусной изоляции от температуры и вибрации.**

**Pic. 4. Dependency of damaging of major frame insulation on temperature and vibration.**

Вибрация оказывает разрушающее действие на все элементы обмотки статора, причем повреждаемой оказывается изоляция пазовой, лобовой и переходной части. Пазовая изоляция подвержена сжатию под действием электродинамических сил, а при наличии зазоров в пазу она дополнительно подвергается ударам и истиранию о стенки паза. При отсутствии свободного перемещения обмотки в пазу в изоляции, кроме растяжения и сжатия, возможно также появление деформации сдвига. При изгибе лобовых частей обмотки наибольшие напряжения возникают в местах выхода стержней или катушек из пазов, где изоляция испытывает напряжения сжатия и растяжения. Кроме того, она сминается на прокладках и в местах соприкосновения с бандажами.

Следует отметить, что большинство традиционно используемых в электромашиностроении полимерных материалов обладает сравнительно невысокой усталостной прочностью, поэтому продолжительная вибрация вызывает в изоляции образование и увеличение числа трещин, отслоений и других дефектов. Степень влияния вибрационных нагрузок возрастет при длительной эксплуатации и естественном старении изоляции, что в основном связано с ослаблением крепления обмотки. При действии вибраций происходит постепенное разрушение пропитывающего состава и нарушение цементации обмотки, отдельные проводники получают возможность относительного перемещения, что существенно увеличивает вероятность витковых замыканий, являющихся основной причиной отказов электромеханических преобразователей.

Априорная оценка влияния механических нагрузок на надежность ГЭМП может быть сделана на основе флуктуационной теории прочности, устанавливающей связь прочности полимерной изоляции и времени воздействия механической нагрузки. Согласно этой теории, основным механизмом разрушения является разрыв химических межатомных связей под действием тепловых флуктуаций. Приложенное механическое напряжение уменьшает энергетический барьер химических связей и увеличивает вероятность процесса разрушения, т. е. разрушение материала можно рассматривать как постепенный термоактивационный процесс, в котором механическое напряжение представляет собой фактор, обеспечивающий и ускоряющий термическое разрушение.

Теория прочности позволяет определить качественный характер влияния внешних факторов на надежность ГЭМП. Для получения количественных показателей надежности необходимы экспериментальные исследования повреждаемости элементов изоляции при воздействии влажности или вибрации с одновременным учетом температуры. Такой подход реализован при лабораторных испытаниях макетных образцов капсулированных обмоток в течение 1000 часов, результаты приведены на рис. 1–4. В качестве показателя надежности для витковой изоляции использовано приращение числа отказов на единицу длины, для корпусной (пазовой) – приращение числа отказов на единицу площади до и после воздействия внешнего фактора.





Сравнительный анализ экспериментальных данных и статистических отказов изоляции обмоток электромеханических преобразователей негерметичного исполнения позволяет сделать следующие выводы.

Зависимость повреждаемости как пазовой, так и витковой изоляции ГЭМП от уровня влажности и вибрационного ускорения практически линейна. Увеличение влажности от 70 до 100% приводит к росту приращения образования повреждений приблизительно на 12–18% в зависимости от эксплуатационной температуры. При аналогичных внешних воздействиях повреждаемость изоляции обычных обмоток возрастает на 27–40%.

Вибрационные нагрузки в диапазоне 1–6 г приводят к незначительному снижению прочности витковой изоляции герметичных электромеханических преобразователей и таким образом не оказывают существенного влияния на их эксплуатационную надежность.

Для общепромышленного оборудования изменение уровня вибрационного ускорения при испытаниях от 0 до 6 г даже в течение небольшого времени порядка 150–450 часов и температуре 130°С приводит к увеличению приращения дефектности витковой изоляции на 28%, пазовой — на 24%, при 160°С — соответственно на 77 и 70,5%. То есть капсулирование обмотки статора позволяет существенно снизить ее повреждаемость под воздействием влажности и вибрации. В то же время герметизация обмотки, особенно при использовании традиционных композиционных материалов на основе терморезистивных связующих, приводит к существенному ужесточению теплового состояния обмотки.

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что зависимость приращения повреждаемости как витковой, так и пазовой изоляции от температуры обмотки имеет экспоненциальный характер. Увеличение температуры обмотки при испытаниях в течение 300 часов от 130°С до 190°С приводит к возрастанию приращения повреждаемости витковой изоляции с  $1,931 \cdot 10^{-4}$  до  $34,74 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>-1</sup>, пазовой — от  $0,04901 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>-2</sup> до  $0,5028 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>-2</sup>.

Для улучшения теплового режима работы могут быть рекомендованы различные способы, в том числе связанные с использованием модифицированных капсулирующих материалов. При этом необходимо учитывать, что на ГЭМП одновременно оказывают разрушающее воздействие электромагнитные, тепловые и механические факторы. Поэтому композиционный материал должен обеспечивать не только высокое электрическое сопротивление и механическую прочность, но и термическую устойчивость. Примером композитного гетерофазного материала, отдельные фазы которого выполняют различные функции, обеспечивая при этом свойства, которых не имеет ни один из компонентов композита в отдельности, является антифрикционный неэлектропроводящий материал на основе эпоксидно-диановой смолы с наполнителем из порошка фторопласта, дисульфида молибдена, рубленого стеклянного или базальтового волокна и алюмосиликата.

Определение оптимального соотношения между отдельными компонентами высокодисперсной структуры, в которой отдельные элементы находятся в агрегатном состоянии, причем коллоидные частицы имеют термодинамические свойства соответствующей фазы состояния, представляет отдельную задачу, требующую учета предварительного расположения отдельных элементов, определяемого факторами нехимического межмолекулярного воздействия [1].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ким К. К., Амосов О. С., Иванов С. Н. Регулирование теплового процесса в купейном вагоне // Мир транспорта. — 2010. — № 2. — С.96–101.
2. Ким К. К., Иванов С. Н., Амосова Л. Н. Моделирование и управление электромеханическими теплогенераторами на основе нейросетевых и нечетких алгоритмов // Электричество. — 2009. — № 10. — С.36–40.
3. Иванов С. Н., Ким, К.К., Кузьмин В. М. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы. — СПб.: ОМ-Пресс, 2009. — 348 с.
4. Ким К. К., Иванов С. Н. Новая система отопления пассажирских вагонов // Железнодорожный транспорт. — 2009. — № 2. — С.45.
5. Ким К. К., Иванов С. Н., Семibrатова М. В. Материаловедческие основы комплексного повышения надежности транспортного электрооборудования // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте: Материалы Шестого международного симпозиума «Элтранс-2011». — СПб.: ПГУПС, 2013. — С.202–211. ●