

ТРАНСПОРТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

621.313.2.014:621.33

КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕНА В ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

*Д-р техн. наук, проф. Ш. К. ИСМАИЛОВ, д-р техн. наук, доц. В. П. СМИРНОВ,
д-р техн. наук, проф. А. М. ХУДОНОГОВ*

Рассмотрена кинетика процесса тепло- и влагообмена в изоляции обмоток тяговых электрических машин подвижного состава, предшествующих ее электрическому пробоя. В связи с этим возникают большие технические и экономические потери, с которыми необходимо бороться применяя математические и физико-технические методы определения электрической прочности изоляции обмоток, разрабатывая новые технические и технологические решения, направленные на повышение ее ресурса. При изменении режимов работы электродвигателей и параметров окружающей среды термодинамическое равновесие нарушается и изоляция обмоток переходит к новому равновесному состоянию. Предложены методы управления температурно-влажностными процессами на электровозе, адаптированные к микроклиматическим условиям эксплуатации, интенсивности процессов тепло- и влагообмена в изоляции

Твердые диэлектрики (изоляционные материалы) являются неотъемлемой частью изоляционных конструкций, используемых в тяговых электродвигателях (ТЭД) и вспомогательных электрических машинах (ВЭМ), силовых и вспомогательных электрических цепях электроподвижного состава (ЭПС). В связи с этим существенным является вопрос о предельной напряженности электрического поля, которую можно допустить в изоляции силовых кабелей, обмоток главных полюсов (ГП) и дополнительных (ДП), компенсационной обмотки (КО) и обмотки якоря ТЭД, ВЭМ при сложных условиях и режимах эксплуатации электровозов постоянного и переменного тока.

Научный и практический интерес представляет исследование механизма электрического пробоя твердого диэлектрика – изоляции обмоток ГП, ДП, КО и обмотки

якоря с целью возможного использования этого явления для установления связи происходящих в изоляции процессов с характеристиками и особенностями твердой структуры.

Ниже рассмотрена кинетика процесса тепло- и влагообмена, предшествующих электрическому пробоя изоляции обмоток ТЭД и ВЭМ. Однако конкретные механизмы нарушений определяются общими физико-химическими процессами изменения структуры, свойств и параметров элементов, причем закономерности, характеризующие эти процессы, могут служить моделями отказов или основой для построения некоторых общих физических моделей отказов и процессов их возникновения.

В связи с тем, что отказы электрических машин ЭПС по причине электрического пробоя изоляции обмоток ГП, ДП, КО и обмотки якоря сопряжены с большими техническими и экономическими потерями, все это вызывает необходимость самого интенсивного применения математических и физико-технических методов определения электрической прочности изоляции обмоток ТЭД и ВЭМ и разработки технических и технологических решений, направленных на повышение ресурса изоляции обмоток.

Единственно верное направление дальнейшего развития теории и техники надежности – это сочетание статистических, вероятностных методов с «...глубоким проникновением в физическую (или физико-химическую) сущность процессов, протекающих в изделии...» [1]. Для этого необходимо установление непосредственной зависимости основных показателей надежности, во-первых, от физических свойств и параметров материалов и элементов, от физико-химических процессов изменения этих свойств и параметров и, во-вторых, от интенсивности эксплуатационных воздействий с учетом случайного характера величин и процессов. Изучение физических закономерностей изменения свойств и параметров элементов, кинетики процессов, вызывающих изменения, представляется особенно важным, если иметь в виду, что существо проблемы надежности заключается в конечном счете в изменчивости материалов и элементов во времени при заданных условиях эксплуатации.

Вместе с тем изучение физико-химических процессов, кинетики процесса тепло- и влагообмена, способных привести к отказам обмоток полюсов, якоря, создает возможность научно обоснованного выбора наиболее эффективных конструктивно-технических и технологических путей повышения надежности электрической прочности изоляции обмоток ГП, ДП, КО, обмотки якоря, ТЭД в целом; априорной оценки надежности изоляционного материала обмотки, отвечающей природе явлений; разработки научно обоснованных методов ускоренных испытаний на надежность электрической

прочности изоляции обмоток, сокращения объема необходимых испытаний; прогнозирования надежности ресурса изоляции каждой обмотки или всех обмоток ТЭД в целом.

Кинетика процесса тепло- и влагообмена в обмотках электродвигателей происходит постоянно. При любом изменении режимов работы ТЭД и параметров окружающей среды термодинамическое равновесие нарушается и изоляция обмоток полюсов, якоря ТЭД переходит к новому равновесному состоянию, обмениваясь с атмосферой влагой и теплом. Наиболее перспективными методами управления температурно-влажностными процессами на электровозе следует считать такие, которые будут адаптироваться к микроклиматическим условиям эксплуатации ТЭД, режимам его нагрузки и конструктивным особенностям ТЭД.

Изоляция обмоток ТЭД представляет собой капиллярно-пористую коллоидную систему, реагирующую на малейшее изменение влажности и температуры атмосферы посредством ответного изменения комплекса своих свойств. Эти изменения пропорциональны приложенному воздействию, т. е. степени изменения параметров нагрузки и внешней среды. Более значительное влияние на величину изменения свойств изоляции обмоток оказывает интенсивность процессов переноса тепла и влаги в изоляции. Диэлектрические свойства существенно понижаются при повышении интенсивности переноса тепла и влаги.

Исследование гигротермического равновесного состояния различных тел широко освещено в трудах А. В. Лыкова [2]. Установлено, что в состоянии равновесия с окружающим влажным воздухом температура тела равна температуре воздуха, а давление пара воды в материале равно парциальному давлению водяного пара в воздухе (молекулярное равновесие). Влагосодержание коллоидного капиллярно-пористого тела приобретает некоторое постоянное значение, называемое равновесным удельным влагосодержанием или равновесной влажностью. Равновесная влажность материала зависит от температуры, влажности окружающего воздуха и от метода достижения равновесия. Если материал в процессе установления равновесия отдавал влагу, то равновесие было достигнуто путем десорбции или сушки, если же поглощал влагу, то равновесное состояние наступило путем сорбции или увлажнения. Обычно содержание водяного пара в воздухе характеризуют относительной влажностью воздуха φ , равной отношению концентрации водяного пара $\omega_{п}$ (количество водяного пара в единице объема влажного воздуха) к максимальной концентрации ω_{\max} при той же температуре и при данном барометрическом давлении: $\varphi = \omega_{п} / \omega_{\max}$.

При температуре, меньшей 100°C , и барометрическом давлении $\rho_{\text{max}} = \rho_{\text{н}}$, где $\rho_{\text{н}}$ – плотность насыщенного пара при данной температуре. Изменяя относительную влажность воздуха при постоянной температуре, можно получить зависимость между влажностью (влажностью) и давлением пара в изоляционном материале в виде некоторой кривой, называемой изотермой. Если равновесие было достигнуто путем поглощения влаги, то кривая, отражающая этот процесс, называется изотермой сорбции, если же равновесие достигнуто путем удаления влаги, то кривая, отражающая этот процесс, называется изотермой десорбции. Изотермы сорбции и десорбции имеют S-образный вид (S-образная кривая) и поэтому могут быть использованы для анализа протекания процессов тепло- и влагообмена в изоляции обмоток электрооборудования.

Существующие системы вентиляции электровозов предназначены для обеспечения нормального теплового режима работы электрооборудования при температуре окружающей среды от -60 до $+40^{\circ}\text{C}$ и для защиты его от вредного влияния внешних климатических факторов: дождя, снега, пыли, низкой температуры, влажности. Однако, анализ эксплуатации электровозов Восточно-Сибирской железной дороги в условиях низкой температуры (на направлении Тайшет – Таксимо, «северное направление ВСЖД») показал, что надежность изоляции обмоток ТЭД значительно ниже по сравнению с эксплуатацией в условиях более высокой температуры (на направлении Мариинск – Карымская, «южное направление ВСЖД»). Наиболее существенная разница по надежности изоляции обмоток ТЭД по «северному» и «южному» направлениям проявляется после истечения гарантированных заводами сроков эксплуатации.

При проектировании ТЭД явления, протекающие в процессе тепло- и влагообмена, формально учитываются. Программой квалификационных испытаний предусматривается исследование ТЭД на нагрев, охлаждение, влаго- и хладостойкость. По результатам этих испытаний, а также на основании эксплуатации электровозов в реальных климатических зонах производится корректировка в сторону повышения надежности изоляции обмоток ТЭД. Методика квалификационных испытаний ТЭД на влагостойкость в камере влаги КТ БВ-8000 предусматривает четыре цикла по 24 часа, т. е. испытания проводятся в течение четырех суток. В качестве примера ниже приведены фрагменты результатов испытаний на влагостойкость ТЭД типа НБ-514 (по протоколам ЭМ-14-85 ВЭлНИИ). Перед постановкой ТЭД в камеру сопротивление изоляции обмоток составило, МОм:

Таблица 1

	Двигатель № 624	Двигатель № 550
Цепь якоря – корпус	300	450
Обмотка ГП – корпус	5000	2500
Цепь якоря – обмотка ГП	5600	3500

Сопротивление изоляции указанных цепей в конце последнего часа третьего цикла составило, МОм:

Таблица 2

	Двигатель № 624	Двигатель № 550
Цепь якоря – корпус	0,28	0,25
Обмотка ГП – корпус	800	600
Цепь якоря – обмотка ГП	800	600

Снижение сопротивления изоляции обмоток якоря ТЭД типа НБ-514 в ходе испытания их на влагостойкость в 1000 раз указывает на очень низкий запас прочности изоляции против влагопоглощения. Это является подтверждением того, что необходимо внедрение систем адаптивного управления температурно-влажностными режимами и особенно для регионов Сибири и Севера, так как в этих регионах на надежность изоляции обмоток ТЭД существенное влияние оказывают суточные перепады температуры и влажности.

Систему дифференциальных уравнений, описывающую процесс тепло- и влагообмена в изоляции обмоток ТЭД, можно записать следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU}{d\tau} = K_{11} \nabla^2 U + K_{12} \nabla^2 t + K_{13} \nabla^2 P_m + K_{14} \nabla^2 V; \\ \frac{dt}{d\tau} = K_{21} \nabla^2 U + K_{22} \nabla^2 t + K_{23} \nabla^2 P_m + K_{24} \nabla^2 V; \\ \frac{dP_m}{d\tau} = K_{31} \nabla^2 U + K_{32} \nabla^2 t + K_{33} \nabla^2 P_m + K_{34} \nabla^2 V; \\ \frac{dV}{d\tau} = K_{41} \nabla^2 U + K_{42} \nabla^2 t + K_{43} \nabla^2 P_m + K_{44} \nabla^2 V. \end{array} \right. \quad (1)$$

Система уравнений (1) является наиболее общей, она справедлива для любого вида тепло- и влагообмена в процессах нагрева и охлаждения, сорбции и десорбции в изоляции обмоток ТЭД. Она показывает, что изменение объема обмоток ТЭД V с течением времени происходит под действием трех движущих сил: изменения влагосодержания U , температуры t и давления P_m . Трудности разработки схемы численного решения системы дифференциальных уравнений (1) связаны с определением коэффициентов тепло- и массопереноса (K_{11}, \dots, K_{44}). Задача получается достаточно сложной в аналитическом отношении, так как она является существенно нелинейной. Однако под действием этих трех движущих сил увеличивается или уменьшается объем изоляции обмоток ТЭД, в результате чего в изоляции происходит образование микротрещин и микропустот.

Решение данной задачи можно осуществить на основе увеличения объема обмоток ТЭД в процессе тепло- и влагообмена. Надо полагать, что кривые увеличения объема изоляции обмоток ТЭД и кривые сорбции и десорбции имеют одинаковый S -образный вид. Путем графического дифференцирования можно получить кривые скорости роста объема обмоток ТЭД, с помощью которых можно наиболее полно анализировать кинетику процесса тепло- и влагообмена. Кривые скорости роста объема изоляции обмоток ТЭД будут иметь трапецеидальный вид. Физически это объясняется наличием в процессе увеличения объема изоляции обмоток ТЭД и скорости этого процесса трех основных периодов: нарастающей, постоянной и спадающей скорости увеличения объема изоляции обмоток ТЭД. Все три периода можно описывать одним уравнением с S -образной кривой:

$$\square \frac{dV}{d\tau} = K_m (V_{\text{разн}}^{\text{кон}} - V)(V - V_{\text{разн}}^{\text{нач}}). \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет протекание процесса тепло- и влагообмена в изоляции обмоток ТЭД под действием двух движущих сил: отклонения текущего объема изоляции обмоток ТЭД V от начального разнообъемного значения $V_{\text{разн}}^{\text{нач}}$ и отклонения V от конечного разнообъемного значения $V_{\text{разн}}^{\text{кон}}$.

Под разнообъемностью понимается соотношение объемов в изоляции обмоток ТЭД между сухой частью и водой. Наличие положительного и отрицательного знаков перед уравнением (2) указывает на то, что в процессах тепло- и влагообмена за счет всех движущих сил происходит увеличение или уменьшение объема изоляции обмоток ТЭД.

Таким образом, процессы разрушения, протекающие в твердом теле, существенно зависят от его физико-химического взаимодействия с окружающей средой. Воздействие почти всех активных сред начинается с адсорбции элементов среды (молекул или ионов) на поверхности твердого тела, в связи с чем адсорбционный механизм влияния среды является первичным (предшествующим всем другим видам влияния внешней среды на диэлектрические свойства изоляционных материалов) и наиболее универсальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность / Р. Хевиленд. М.: Энергия, 1966. 336 с.
2. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.