



УДК 621.313

ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОПИТКИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Пронин Егор Андреевич

студент

Кутуева Юлия Рустамовна

студент

Нуриева Альбина Мавлитовна

студент

Павленкова Анна Андреевна

студент

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Аннотация. В последнее время электрические машины получают все большее распространение и используются во многих отраслях промышленности, включая транспортную и авиакосмическую промышленность. Современные требования к высокоэффективным устройствам, обладающими небольшими массогабаритными характеристиками, приводят к увеличению рабочих температур устройств, что крайне негативно сказывается на надежности работы, безопасности эксплуатации и долговечности электрической машины. В данной статье представлена информация о современном состоянии использования материалов для пропитки обмоток электрических машин. Показывается эффективность материалов с точки зрения температурного режима деталей электрической машины. Выделен основной недостаток применения материалов для пропитки обмоток в электрических машинах. Также в статье приведена оценочная информация о рынке терморегулирующих материалов в области электроники и электромеханики.

Ключевые слова: обмотки электрических машин, управление температурным режимом, материалы для пропитки обмоток, изоляционные материалы, охлаждение электрических машин.

1. Введение

Наблюдение за температурным режимом электрической машины имеет ключевое значение для увеличения их производительности, обеспечения надежности и продолжительности жизненного цикла [1]. Тепловые характеристики электрических машин неразрывно связаны с теплофизическими свойствами материалов активных и пассивных компонентов в конструкции электрических машин. К активным компонентам электрических



машин относятся те части электрической машины, которые вносят свой вклад в возникновение электромагнитного крутящего момента и являются жизненно-важными компонентами для работы электрической машины. Изоляционный материал, в свою очередь, относится к пассивным компонентам электрической машины, потому что они не оказывают вклад в возникновение электромагнитного крутящего момента. Однако обычно изоляционный материал носит собой решающий характер при определении температурных ограничений, технологии изготовления и длительности срока службы электрических машин, поскольку тепловые свойства изоляционных материалов неразрывно связаны с тепловыми характеристиками и надежностью электрических машин [1, 2].

2. Материалы для пропитки обмоток и заполнения зазора между обмотками и корпусом

При использовании необработанных обмоток в электрических машинах наблюдается склонность обмоток к совершению вибраций и подверженность изгибу во время работы электрической машины, что может привести к отказу машины. По этой причине обмотки статора традиционно пропитывают лаком или эпоксидной смолой для уменьшения любой возникающей в обмотке вибрации, а также для препятствия совершению обмоткой механического изгиба, появляющегося во время работы электрической машины. Пропитка обмоток положительно сказывается на теплопроводности катушек за счет того, что пропитка значительно уменьшает зазоры и заполняет пустоты между жилами проводников и полюсами электрической машины [3].

Наиболее популярной обработкой обмотки электрических машин является пропитка лаком. Лак повышает электрическую прочность обмоток, что с физической точки зрения может быть объяснено заполнением пор и мельчайших капилляров лаком, который по сравнению с воздухом обладает большей электрической прочностью. Помимо этого, теплопроводность лака также выше теплопроводности воздуха, что положительно сказывается на передаче тепловой энергии от источника тепла к охлаждающей среде, вследствие чего снижается рабочая температура обмоток [4].

Эпоксидные смолы не являются настолько широко распространенным пропитывающим материалом как лак, и скорее относятся к альтернативным материалам, нежели основным. Тем не менее, эпоксидные смолы показывают более высокую теплопроводность по сравнению с традиционными лаками за счет более низкого удельного сопротивления и более низкой диэлектрической проницаемости [3, 5].

Полимеры на силиконовой основе, обладающие высокими показателями теплопроводности, и эпоксидные смолы являются наиболее распространенными герметизирующими материалами, способными стать перспективной, недорогой и компактной

альтернативной прямой системе охлаждения. Заливка материалов между обмотками и корпусом создает дополнительные пути для отвода тепловой энергии. Ранее предполагалось, что герметизация концевых обмоток статора снижает температуру горячей точки обмотки до 50 °С при заданной выходной мощности и увеличивает выходную мощность на 15-25% по сравнению с машиной без заливки [6].

В работе [7] проводилось исследование количественного влияния заливочного материала на силиконовой основе на способность отвода тепла. Утверждается, что при использовании заливочного материала на силиконовой основе осевой поток увеличился на 5,6% по сравнению с классической конструкцией за счет заливки торцевых обмоток генератора переменного тока для авиакосмического применения. Во время тепловых испытаний на постоянном токе зафиксировано снижение температуры обмотки примерно на 10,5%.

Необходимо указать, что заливочные материалы обычно обладают высокой теплопроводностью (до 3,5 Вт/(м·К)). Увеличить теплопроводность можно при помощи металлических нано- или микропорошком. Однако к заливочным материалам, которые являются частью изоляции, предъявляются требования достаточно высокой диэлектрической прочности для профилактики любых дефектов, связанных с изоляцией.

Сравнение материалов на силиконовой основе и материалов из эпоксидной смолы показало, что силиконовая основа обладает преимуществами с точки зрения рабочих температур, электрической изоляции и обработки. Эпоксидная смола показывает преимущества с точки зрения химической стойкости, жесткости и адгезионной прочности [8].

Большинство исследований по управлению температурным режимом электрической машины сходятся на том, что самые высокие температуры в электрических машинах обычно возникают в электрических обмотках. Есть две возможные причины этого явления. Во-первых, по сравнению с другими элементами электрической машины, потери в меди имеют большую величину. Во-вторых, наличие наружной изоляции проводов, что затрудняет теплоотвод от обмоток в окружающую среду. Решающую роль в надежности изоляционных материалов играет рабочая температура. Работа обмотки в течение продолжительного времени под воздействием высоких температур отрицательно сказывается на сроке службы и диэлектрических свойствах электроизоляционных материалов. Помимо этого повышается вероятность необратимого размагничивания, а также происходит увеличение удельного сопротивления проводников, что приводит к увеличению потерь в меди [1].

В [9, 10] применены системы непрямого жидкостного охлаждения в виде корпуса жидкостного охлаждения и заливочный материал вокруг концевых обмоток в качестве проводника тепловой энергии. Результаты показали, что заливочный материал позволил снизить температуру концевых обмоток на 7 °С для машины с радиальным потоком и на 17 °С



для машины с осевым потоком.

В [11] аналогично был использован заливочный материал на силиконовой основе, располагающийся между концевыми обмотками и корпусом синхронного двигателя с постоянными магнитами. По сравнению с оригинальной конструкцией конструкция электрической машины с заливочным материалом показывала лучшие температурные характеристики: в одинаковых рабочих условиях максимальная разница температур составила 27,3 °С.

Обратной стороной применения заливочных материалов является значительное увеличение веса электрической машины, так как заливочный материал заполняет свободное пространство, которое изначально было воздухом. Помимо этого, заливочные материалы должны обладать высоким уровнем электроизоляции и механической прочности при высоких температурах, чтобы электрические машины имели высокую надежность при работе.

3. Рынок материалов для теплового регулирования

Техническое развитие электрических машин, выражающееся в уменьшении массогабаритных параметров и увеличении выходных технических характеристик, приводит к увеличению рабочих температур электрической машины. Это также приводит к повышению спроса и развитию рынка терморегулирующей продукции, в которую входят полупроводниковые пасты, заливочные материалы, материалы с фазовым переходом, полупроводящие ленты и термальные гели/смазки. Рынок материалов охватывает очень широкую область промышленности, включая потребительскую электронику, автомобилестроение, авиационную и космическую промышленность, здравоохранение и телекоммуникации.

По данным Global Market Insights (GMI) в 2018 году объем рынка материалов для теплового регулирования превысил 4,5 млрд. долларов США. По оценкам к 2026 году ожидается увеличение объема рынка до 8,7 млрд. долларов США. Также согласно GMI термопасты являются наиболее распространенным продуктом на рынке в области регулирования температурным режимом электротехнических устройств [12].

По мере технического развития электрических машин также во всем мире развивается рынок терморегулирующей продукции, в которую входят полупроводниковые пасты, заполнители зазоров, материалы с фазовым переходом, полупроводящие ленты и термальные гели/смазки. Рынок охватывает различные области промышленности, включая потребительскую электронику, автомобилестроение, аэрокосмическую промышленность, здравоохранение и телекоммуникации.

По данным Global Market Insights (GMI) в 2018 году объем рынка превысил 4,5 млрд. долларов США, а в 2026 году, как ожидается, достигнет 8,7 миллиарда долларов США. Точно

так же, согласно GMI, теплопроводная паста является наиболее преобладающим продуктом в области управления температурным режимом [12].

4. Вывод

В данной статье проведен обзор современного состояния пропиточных материалов для пропитки обмоток электрических машин. Самым распространенным материалов в настоящее время является лак. Другие материалы, такие как эпоксидная смола или заливочные материалы на силиконовой основе не являются столь распространенными, однако над ними проводятся исследования и данные материалы показывают свою эффективность. Основным недостатком использования пропиточных материалов является увеличение веса электрической машины. Анализ рынка показывает возрастающую заинтересованность потребителей в терморегулирующих материалах, и заинтересованность растет с каждым годом.

Список литературы:

1. Yang Y, Bilgin B., Kasprzak M, Nalakath S., Sadek H., Preindl M., Cotton J., Schofield N., Emadi A. Thermal management of electric machines. IET Electrical Systems in Transportation, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 104-116.
2. Hemmati R., Wu F., El-Refaie A. Survey of insulation systems in electrical machines. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), May 2019, pp. 2069-2076.
3. Liu M., Li Y., Ding H., Sarlioglu B. Thermal management and cooling of windings in electrical machines for electric vehicle and traction application. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Jun. 2017, pp. 668-673.
4. Емелин, А. В. Пропитка обмоток электрических машин мощностью до 15 кВт / А. В. Емелин, А. С. Зименский // Евразийское Научное Объединение. – 2020. – № 8-2(66). – С. 102-104.
5. Electrical Insulating Epoxy Resins — Ultimeg Range, Datasheet. [Электронный ресурс]. URL: https://www.aev.co.uk/userfiles/files/Ultimeg_Epoxy_GTS_2019-v1_4.pdf (дата обращения 09.07.2021).
6. Nategh S., Barber D., Lindberg D., Boglietti A., Aglen O. Review and trends in traction motor design: Primary and secondary insulation systems. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Sep. 2018, pp. 2607-2612.
7. Kulan M.C., Baker N.J. Development of a thermal equivalent circuit to quantify the effect of thermal paste on heat flow through a permanent magnet alternator. IEEE Transactions on Industry Applications, Mar. 2019, vol. 55, no. 2, pp. 1261-1271.
8. Nategh S., Barber D., Lindberg D., Boglietti A., Aglen O. Review and trends in traction motor



design: Primary and secondary insulation systems. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Sep. 2018, pp. 2607-2612.

9. Polikarpova, M., Lindh, P.M., Tapia, J.A., Pyrhönen, J.J. Application of potting material for a 100 kW radial flux PMSM. 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Sep. 2014, pp. 2146-2151.
10. Polikarpova, M., Lindh, P.M., Gerada C., Rilla M., Naumanen V., Pyrhönen, J.J. Thermal effects of stator potting in an axial-flux permanent magnet synchronous generator. Applied Thermal Engineering, 2015, vol. 75, pp. 421-429.
11. Sun Y., Zhang S., Yuan W., Tang Y., Li J., Tang K. Applicability study of the potting material based thermal management strategy for permanent magnet synchronous motors. Applied Thermal Engineering, 2019, vol. 149, pp. 1370-1378.
12. Pulidindi K., Pandey H. Electronic thermal management materials market size by product. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/electronic-thermal-management-materials-market> (обращения 09.07.2021).