

УДК 621.3.048

## РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ СИСТЕМ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Федотова А. А., магистрант гр. ЭПм-181, I курс

Научный руководитель: Захарова А. Г., д.т.н., профессор

Кузбасский государственный технический университет

имени Т. Ф. Горбачева

г. Кемерово

С развитием крупного электромашиностроения возросли требования как к самому оборудованию, так и к отдельным его узлам. Одними из важнейших компонентов электрических машин являются электроизоляционные материалы и системы изоляции, определяющие эксплуатационную надежность электрооборудования. До 80% стоимости всех материалов в электрических машинах приходится на изоляцию. В связи с этим уделяется большое внимание разработкам новых электроизоляционных материалов и технологиям их переработки в системе изоляции.

Активные материалы работают в электрических машинах при больших удельных нагрузках, потери мощности в единице объема этих материалов достаточно высоки. Для эффективного отвода выделяющегося тепла требуются большие перепады температур активных частей над температурой окружающей среды. В связи с тем, что изоляция служит для отвода тепла от меди, она должна обладать высокой теплопроводностью и выдерживать высокую температуру. В процессе эксплуатации изоляция подвергается деформации под действием вибрации, особенно на лобовых частях обмотки. Кроме того, она периодически подвергается ударным механическим воздействиям, которые возникают при прохождении по обмотке больших токов при пусках и торможениях машин, а также при набросе и сбросе нагрузки. Так же негативное влияние на изоляцию оказывает неравномерный нагрев отдельных частей обмотки в переходных режимах. В связи с этим, разработчики электрических машин стремятся получить изоляцию, обладающую повышенными значениями электрической прочности, превышающими значения прочности изоляции, изготовленной из аналогичных материалов другими способами и способную противостоять указанному выше комплексу эксплуатационных воздействий.

Повышение уровня нагревостойкости и свойств систем изоляции позволяет улучшить удельные характеристики электрических машин или увеличить срок их службы, а именно, увеличить электрические, механические и тепловые нагрузки на изоляцию.

Наиболее широкое применение в электротехнической промышленности нашел метод вакуум-нагнетательной пропитки изоляции. Глубокая пропитка изоляции обеспечивает отсутствие в ней воздушных и газовых

включений, что приводит к увеличению электрической прочности и значительно повышает напряжение ионизации изоляции.

Александров Н. В. и Трубачев С. Г. в марте 1962 года предложили производить пропитку и запечку изоляции в котле, заполненным легкоплавким материалом. Новая технология явилась логическим продолжением ранее опробованных методов изготовления изоляции.

В 1963-1964 годах были проведены работы по усовершенствованию технологии, которые позволили значительно упростить процесс изготовления изоляции. В качестве опрессовочной среды была применена вода, было снижено давление при пропитке и запечке. Методу изготовления изоляции вакуум-нагнетательной пропиткой при внедрении в эксплуатацию было присвоено наименование «Монолит».

В настоящее время большее распространение получили два основных направления технологии изготовления изоляции. Изоляция, изготавливаемая по первой технологии, состоит из пропитанных лент с последующей опрессовкой и термообработкой в пресс-форме или гидростатической опрессовкой битумом в котле. Во втором случае изоляция выполняется из сухих слюдоодержащих лент с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой эпоксидным компаундом.

В статье речь пойдет о технологии изготовления изоляции методом вакуумно-нагнетательной пропитки «Монолит». Положительный опыт эксплуатации синхронных конденсаторов и генераторов доказал высокую надежность и долговечность рассматриваемой системы изоляции.

Технологический процесс изготовления изоляции «Монолит» заключается в следующем.

На стержни генератора механизированным способом наносят определенное количество слоев сухой стеклослюдинитовой ленты, содержание под克莱ивающего вещества в котором составляет 3 – 4 %. Поверх изоляции накладывают фторопластовую пленку. После этого изолированные стержни в пазовой части помещают в пресс-планки, фиксирующие размер, и укладывают стопкой таким образом, чтобы лобовые части плотно прилегали одна к другой. Пакет стержней фиксируется в нескольких местах бандажом. После этого его подвергают сушке при температуре  $150\pm5$  °С в течение 3 – 4 часов. Высущенный пакет помещают в специально склеенный из вакуумной резины мешок. Вакуумирование производится при остаточном давлении не выше 0,5 мм рт. ст. в течение 3 – 4 часов. Затем через штуцер под вакуумом подается расчетное количество приготовленного эпоксидного компаунда.

Мешок с пакетом помещают в тележку котла, закатывают ее в котел, заполненный водой, разогретой до температуры 70 – 80 °С. В течение 10 – 15 минут давление доводится до 2,0 МПа. При указанной температуре и давлении изоляция выдерживается в течение 3 часов, после чего выпускаются излишки эпоксидного компаунда из коробки для пропитки, уменьшив давление до 1,5 МПа. В течение следующих 4 – 5 часов увеличивают температуру до 90 – 95 °С, давление до 2 МПа, после чего запекают изоляцию

в течение 12 часов. По истечению времени давление в котле уменьшают до нуля, перекачивают воду и звлекают пакет стержней из котла, освободив стержни из герметичной коробки. После пакет помещают в термостат, где стержни запекаются в преспланках при температуре  $150 \pm 5$  °С в течение суток. Ввиду того, что пропитка и запекание изоляции осуществляется в ограниченном объеме и пропиточный состав не вытекает из изоляции при запекании, изготовление изоляции не сопровождается выделением токсичных веществ.

По вышеописанному способу можно изготавливать изоляционные материалы в виде листов, трубок, изоляционные конструкции сложной формы, изоляцию обмоток трансформаторов, конденсаторов, изоляцию стержневых обмоток электрических машин и т. д. Изоляция «Монолит» является сложной системой, состоящей из ряда компонентов. В своем составе она имеет слюдинитовую бумагу, стеклоткань, пропиточный компаунд.

В процессе производства было обнаружено, что технологических процесс изготавления изоляции «Монолит» не мог быть распространен на катушечные обмотки крупных электрических машин и стержневые обмотки турбогенераторов по причине сложной конфигурации. В связи с этим, необходимо было решить вопрос разработки более простой технологии изготовления изоляции обмоток. Проблема вскоре была решена. Так, в 1965 были разработаны основы технологии изготовления новой изоляции и внедрены на заводе ПАО НПО «ЭЛСИБ» (бывший «Сибэлектротяжмаш»). Новая технология изготовления изоляции получила название «Монолит-2». Усовершенствованная технология позволила изготавливать полностью собранные статоры с обмоткой высоковольтных электродвигателей и турбогенераторов.

Изоляция, изготовленная по технологии «Монолит-2», разрабатывалась для применения в катушечных обмотках высоковольтных электрических машин мощностью выше 100 кВт. Поскольку такие машины подвергаются достаточно большим нагрузкам, для них необходимо иметь обмотки, изоляция которых будет обладать высокой эластичностью и допускать большие деформации при укладке обмотки без ухудшения ее свойств. Это стало возможным при изолировании корпусной изоляции катушек непропитанной лентой с последующей пропиткой и запечкой обмотки полностью собранного статора в термостате при повышенной температуре. В качестве пропиточного компаунда при изготовлении изоляции по технологии «Монолит-2» применяется эпоксидная смола с отвердителем ангидридного типа. При такой технологии изготовления катушки прочно приклеиваются к пазам статора, обеспечивая тем самым значительное увеличение жесткости конструкции обмотки и ее виброустойчивость. Аналогично изготавливается изоляция стержней турбогенераторов малой и средней мощности.

При всех положительных качествах изоляции «Монолит-2» готовая обмотка имеет существенный недостаток. В случае пробоя изоляции сложно выполнить ремонт. Поэтому большое внимание уделяется предварительным

испытаниям непропитанной изоляции с целью своевременного выявления дефектов перед пропиткой и запеканием.

Изготовление изоляции по технологии «Монолит-2» получило широкое применение на электромашиностроительных заводах для двигателей с шаблонной обмоткой. Однако, наряду с упомянутыми выше двигателями выпускались двигатели 22-го и 24-го габарита, размеры которых превышали 3 метра. Для полной пропитки статора таких двигателей необходим был котел большого диаметра и объем единовременно используемого компаунда должен был составлять несколько десятков тонн. Обновление компаунда при пропитке статоров таких двигателей было небольшим, поскольку эти серии выпускались малыми партиями, в результате чего компаунд быстро набирал вязкость. В связи с этим, пропитка статоров в сборе в рассматриваемом случае была экономически нецелесообразна.

И снова был поднят вопрос доработки технологии производства изоляции. Для обеспечения крупногабаритных двигателей термореактивной изоляцией были разработаны технологические решения по вакуумно-нагнетательной пропитке эпоксидным компаундом отдельных катушек с последующей укладкой их в статор и термообработкой в термостате или пропусканием тока по обмотке (рисунок 1). Этот способ изготовления изоляции получил название «Монолит-3».



Рисунок 1 – Укладка обмоток в статор

Данная технология дала возможность получить термореактивную изоляцию, в которой возможность повреждения витковой изоляции в лобовых частях была устранена за счет эластичного компаунда, что позволило сохранить ремонтопригодность изоляции катушек.

Совершенствование конструкции электрических машин привело к необходимости усовершенствования систем изоляции. Дальнейшие разработки были направлены на уменьшения толщины изоляции обмоток и повышения надежности работы электрооборудования. При уменьшении толщины изоляции необходимо было сохранить надежность и долговечность ее работы при минимальном по возможности изменении технологического процесса изготавления изоляции «Монолит-2».

В результате многочисленных испытаний изоляции, производимой по технологии «Монолит-2», был сделан вывод, что можно уменьшить размеры возможных воздушных полостей в направлении внешнего поля посредством подпрессовки перед пропиткой многослойевой изоляции. Одновременно подпрессовка приводит к уменьшению общей толщины изоляции, т.е. к увеличению коэффициента заполнения паза медью и к снижению поля допусков изолированной обмотки. Усовершенствованная технология производства изоляции получила название «Монолит-4» (рисунок 2). Данная технология используется при производстве обмоток турбо- и гидрогенераторов, синхронных компенсаторов, двигателей высокого напряжения.



Рисунок 2 – Изоляция «Монолит-4» после запечки

Как показал опыт эксплуатации генераторов, основное количество отказов определяется повреждением статорных обмоток. Поскольку в эксплуатации находится большое количество турбо- и гидрогенераторов, имеющих микарентную компаундированную изоляцию, находящуюся в неудовлетворительном состоянии, появилась необходимость решения задачи по восстановлению микарентной изоляции. Для этих целей была разработана технология

производства изоляции, получившая название «Монолит-5». Новая технология позволила осуществлять ремонт стержневых обмоток турбо- и гидрогенераторов с микалентной компаундированной изоляцией, отработавшей эксплуатационный срок. В результате удалось исключить взаимное перемещение и вибрацию элементарных проводников, сцепив их, тем самым придав стержню в целом жесткость, превышающую жесткость стержня с микалентной компаундированной. Также удалось значительно повысить уровни электрических характеристик изоляции элементарных проводников, доведя их до уровней характеристик стержней с термореактивными видами изоляции.

Таким образом, система изоляции «Монолит», пришедшая на смену микалентной компаундированной изоляции, зарекомендовала себя и получила широкое применение при производстве электрических машин и аппаратов.

#### **Список литературы:**

1. Пак В. М. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин / В. М. Пак, С. Г. Трубачев.; под ред. В. М. Пака – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 416 с.
2. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин. В двух книгах. Кн. 2 / В. Г. Огоньков и др.; под ред. В.Г. Огонькова, С. В. Серебрянникова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 304 с.