

УДК 621.31

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

А. И. Мизин, Т. И. Сокирко

Электрические двигатели участвуют во многих сложных и ответственных технологических процессах и операциях, занимают ведущее положение во всех промышленных и многих транспортных механизмах. Отказ в их работе может повлечь за собой существенный ущерб, связанный не только с заменой или ремонтом вышедших из строя электродвигателей, сколько с огромными убытками предприятия из-за простоя технологического оборудования. В данной статье рассмотрены методы повышения стойкости электрической изоляции электродвигателей и генераторов на примере изоляционных лент, заливочных компаундов. Показаны поперечные срезы фрагментов изоляции обмоток на основе стекломикалент и терморективных лент, проанализированы преимущества и недостатки указанных видов изоляции.

Ключевые слова: изоляция электрических машин, повышение стойкости электрической изоляции, терморективные ленты, стекломикаленты, заливочные и обволакивающие компаунды.

В настоящее время электропривод занимает ведущее положение практически во всех промышленных и многих транспортных механизмах. Согласно статистике электроприводом оснащены примерно 85% всех двигательных и силовых механизмов (насосы, компрессоры, вентиляторы, станки, разнообразные технологические машины, бытовая техника и др.). Электрические двигатели участвуют во многих сложных и ответственных технологических процессах и операциях. Отказ в их работе может повлечь за собой огромные убытки предприятия из-за простоя технологического оборудования, а также несет угрозу безопасности жизни людей. Такие убытки могут во много раз превышать стоимость самого электродвигателя, вышедшего из строя. Специфические и тяжелые условия эксплуатации приводят к снижению надежности и долговечности электродвигателей [1].

Распределение повреждений по отдельным узлам электродвигателей изменяется в зависимости от условий их применения, однако наибольшее число повреждений приходится на обмотку статора. В среднем из-за повреждений обмоток двигателей происходит 85 – 95 % отказов, 3 – 8 % отказов происходит вследствие повреждений подшипников. Повреждения обмотки статора показаны на рис. 1.

По характеру повреждений обмоток отказы электродвигателей единой серии распределяются следующим образом: межвитковые замыкания – 93%, повреждения междуфазовой изоляции – 5%, пазовой изоляции – 2%. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев причиной отказов является повреждение межвитковой изоляции, типичное для всыпных обмоток. Повреждения междуфазовой и пазовой изоляции обычно возникают как следствие межвитковых замыканий и представляют развитие последних [2].

Во время эксплуатации изоляция электрооборудования, в том числе и электрических машин, подвергается различным воздействиям, под влиянием которых происходит старение изоляции, то есть не-

обратимое ухудшение ее свойств. Для изоляции электрических двигателей характерным является образование местных дефектов (например, трещин), то есть существенное ухудшение ее электрических свойств на отдельных небольших участках.



Рис. 1. Примеры повреждений обмотки статора

Воздействия, вызывающие повреждения изоляционных материалов, подразделяются на следующие группы: электрические, тепловые, механические и окружающей среды. Во время работы оборудования его изоляция испытывает эти воздействия одновременно, при этом возможно взаимодействие, то есть одновременно приложенные воздействия могут вызывать старение изоляции с иной скоростью, нежели приложенные поочередно. Каждый из перечисленных ранее видов воздействия может оказаться в определенных условиях основным, определяющим процесс старения изоляции или ее части, в этом случае данному виду воздействия будет соответствовать определенный характер старения изоляции и вызываемые этим старением дефекты.

Тепловое старение изоляции является следствием постепенного химического изменения входящих в ее состав органических веществ. Неорганические компоненты изоляции при рабочих температурах практически не претерпевают каких-либо химических изменений, то есть не старятся.

Качество изоляции электрических машин определяет их надежность в эксплуатации, поэтому выбору изоляции и ее изготовлению придается большое значение.

Основным требованием к изоляции является не только ее диэлектрическая прочность. Так как развивающиеся в меди потери обычно отводятся через изоляцию в окружающую среду, то наравне с диэлектрической прочностью и нагревостойкостью изоляция должна обладать хорошей теплопроводностью, что в значительной степени достигается пропиткой и компаундированием.

Большое значение имеют также механическая прочность, влагонепроницаемость, маслостойкость и другие свойства изоляции. Изоляционные материалы для изоляции обмоток статора электродвигателей доступны в различных формах и размерах, в том числе: ленты, рулоны, рукава, подкладки, бумага и ткань. Изоляционные ленты используются для покрытия обмоток (катушек) в выступающей части сердечника. На это покрытие нанесен шеллак или лак для предотвращения поглощения влаги и повышения диэлектрической прочности.

Ленты продаются в рулонах необходимой длины. Доступны различные типы лент: хлопковая, ПВХ, шелковая, полиэфирная, асбестовая, стекловолоконная, тканевая, слюдяная [3].

Обеспечение эффективного теплового контакта путем применения соответствующих теплопроводящих электроизоляционных материалов имеет важное значение в различных отраслях промышленности.

Увеличение теплопроводности электроизоляции приводит к переносу выделяющегося при работе электрических машин тепла от токопроводящих узлов на корпус. При этом облегчается отвод тепла и появляется возможность перехода от систем охлаждения, требующих специальной конструкции корпуса (большая толщина и наличие внутренних каналов), и вспомогательного оборудования (насосов подачи воды или компрессоров подачи газа, систем охлаждения теплоносителя) к системам воздушного охлаждения корпуса.

Применяемые во многих конструкциях стекломикаленты ЛМК-ТТ и кремнийорганические связующие разработок 1960 – 1970 гг. морально устарели и обладают относительно низкими электрической прочностью (15 – 17 кВ/мм), теплопроводностью (порядка 0,08 Вт/мК), водопоглощением и механической прочностью.

Фрагменты катушек статора, изолированные микалентой ЛМК-ТТ, имеют ярко выраженную слоистую структуру. При этом изоляция не является монолитной, между слоями остаются воздушные промежутки, не заполненные лаком. Отсутствие монолитности изоляции на основе микаленты ЛМК-ТТ является следствием того, что в этом случае не происходит проникновения пропиточного лака через щипаную слюду микаленты. Чем больше расслоена изоляция, тем ниже ее электрическая прочность. В микалентной компаундированной изоляции старятся бумажная подложка, лаки и компаунд. При этом подложка становится хрупкой, постепенно происходит ее химическое и механическое разрушение и в результате она может практически совсем исчезнуть, особенно в таких напряженных местах, как выход из паза.

Поперечный срез фрагмента изоляции обмотки на основе стекломикаленты ЛМК-ТТ показан на рис. 2.

Масляный лак, входящий в состав микаленты, и битумный компаунд, которым она пропитывается при компаундировании, при старении становятся из вязких также хрупкими, частично улетучиваются, при механических воздействиях крошатся. Разрушение изоляции на основе стекломикаленты ЛМК-ТТ показано на рис. 3.

В результате этого ослабляется связь как между слоями микаленты, так и между листками слюды в слое, изоляция легко расслаивается. При длительном нагреве микалентной изоляции параллельно с химическими процессами идет также процесс так называемого «распухания», имеющий в своей основе механические явления.

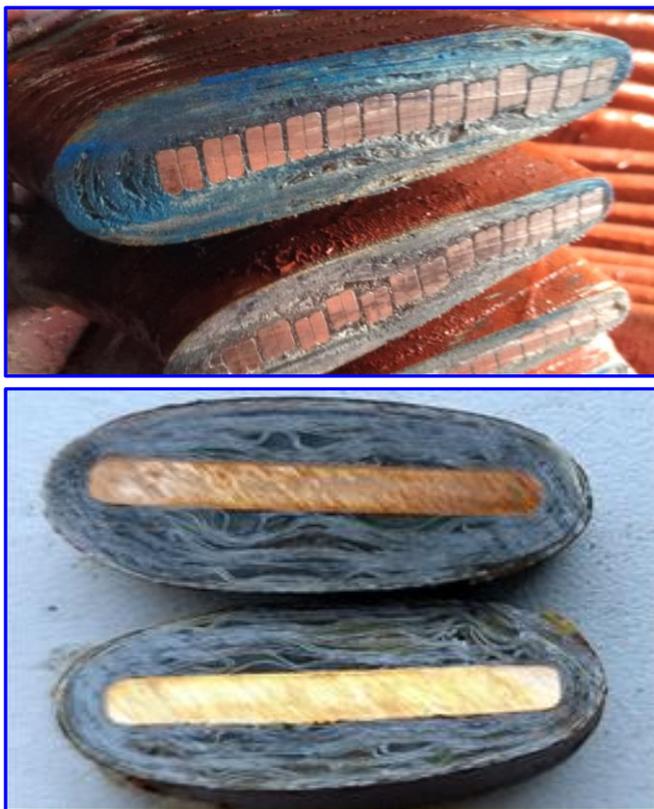


Рис. 2. Поперечный срез фрагмента изоляции обмотки на основе стекломикаленты ЛМК-ТТ



Рис. 3. Разрушение изоляции на основе стекломикаленты ЛМК-ТТ

С повышением температуры резко ухудшаются механические свойства лака и компаунда, вследствие чего листки слюды, согнутые на углах сечения стержня, имеют возможность несколько распрямиться, и тем самым увеличить радиус закругления изоляции на углах стержня. При этом в меньшей степени распрямляются внутренние слои, испытывающие давление внешних слоев, в большей степени – внешние слои, сдерживаемые лишь вязкостью связующего и покровной лентой. В результате описанного процесса сечение изолированного стержня принимает бочкообразную форму, между слоями изоляции, по-разному изогнутыми, появляются или увеличиваются воздушные прослойки, появляется или увеличивается зазор между внутренним слоем изоляции и поверхностью проводников стержня.

Распухание особенно сильно проявляется в местах, где ему ничто не препятствует, в лобовых частях (включая место выхода из паза); в пазовой части оно в значительной степени ограничено размерами паза и происходит лишь на величину начального зазора между стержнем и стенкой паза.

Пришедшая на смену термореактивная лента ЛСп-С-ТПл (ЛСп-Н-ТПл) на основе стекло-слоудинитовых лент, эпоксидных и других компаундов обладает высокой электрической прочностью (25 – 30 кВ/мм), высокой теплопроводностью (0,65 – 0,92 Вт/мК), отличной влаго- и водостойкостью, значительной механической прочностью при рабочей температуре. При изготовлении слюдяной ленты ЛСп-Н-ТПл используется бумага, выработанная из натуральной слюды (флогопит) без разрушения ее кристаллической структуры, что обеспечивает повышенные диэлектрические свойства.

Ленты ЛСп-Н-ТПл пригодны для ручной и механизированной намотки и по некоторым параметрам даже превосходят зарубежные аналоги, которые применяют заводы-изготовители крупных электрических машин (КЭМ) дальнего зарубежья (к настоящему времени изготовлено и успешно эксплуатируются сотни тысяч импортных высоковольтных двигателей, турбо-гидрогенераторов, в том числе и на АЭС, с термореактивной изоляцией).

А разработанные ООО «Диэлектрик», прошедшие испытания, сертификацию ленты ЛСп-Н-ТПл превосходили зарубежные аналоги в несколько раз и с успехом применяются заводами-изготовителями КЭМ даже в странах ближнего зарубежья – Молдове (НП ЗАО «Электромаш», г. Тирасполь), Узбекистане (ПП «UZTELMASH», г. Ташкент), Латвии (Рижский электромашиностроительный завод АО «Крона Групп», г. Рига) и т. д., получили серти-

фикацию на применение в оборудовании тягового подвижного состава ОАО «РЖД» Российской Федерации и в совокупности с заменой изоляционных материалов «Имидофлекс 229» на «Флексимид 2492» (применяемых в конструкции «коробочек» статора электродвигателя) снизили себестоимость обмоток изготавливаемых электродвигателей на 10 – 12 %, себестоимость ремонта обмоток электродвигателей до 50 – 55 %, одновременно повысив качество изделия в целом.

Изоляция, изготовленная с применением пропитанной слюдинитовой ленты марки ЛСп-Н-ТПл, выглядит однородной, монолитной. Раковин и воздушных включений на срезе не обнаружено. Поперечный срез фрагмента изоляции обмотки на основе слюдинитовой ленты ЛСп-Н-ТПл показан на рис. 4.

Использование слюдинитовой ленты ЛСп-Н-ТПл с коэффициентом теплопроводности 0,92 Вт/мК вместо стекломикаленты ЛМК-ТТ с коэффициентом теплопроводности 0,08 Вт/мК дает возможность увеличить тепловую нагрузку более чем в 10 раз с сохранением толщины изоляции. На рис. 5 представлена эпюра распределения температур в процессе теплопередачи через электроизоляцию.

Анализ всех известных способов поддержания эксплуатационной надежности изоляции электродвигателей, основными из которых являются ее капитальный ремонт, техническое обслуживание, периодическая диагностика, обеспечение надежной защитой, показывает, что к главным мероприятиям, способствующим созданию базового ресурса работы изоляционной системы, относятся ее сушка, запекание и пропитка специальными диэлектрическими составами.

Керамико-полимерные теплопроводящие диэлектрические материалы Номакон КПТД-1 являются 100-процентными силиконовыми эластомерами, разработанными для герметизации от внешней среды, электрической изоляции и обеспечения отвода тепла в изделиях тепло-, электро- и радиоэлектронной техники, работающих в интервале температур от -60°C до $+250^{\circ}\text{C}$.

Данные, указанные в таблице показывают, что отечественные слюдинитовые ленты ЛСп-Н-ТПл по своим характеристикам не уступают зарубежным аналогам.

Заливочные и обволакивающие компаунды КПТД-1 полимеризуются при комнатной температуре в твердый резиноподобный материал с высокими диэлектрическими свойствами, стойкий к воздействию вибрационных и ударных нагрузок, ультрафиолетовых лучей, кислорода воздуха, паров воды и большинства химических соединений. Применение компаундов осуществляется путем полной или частичной заливки изделий или нане-

сением на поверхность, при этом толщина слоя компаунда не ограничена, а линейные усадки не превышают 0,1 – 1,5 %.

Время жизнеспособности (текучести) при заливке составляет 10 – 40 минут при комнатной температуре. Время полной полимеризации (вулканизации) составляет не более 24-х часов при комнатной температуре и не более 2-х часов при температуре $+70^{\circ}\text{C}$.



Рис. 4. Поперечный срез фрагмента изоляции обмотки на основе слюдинитовой ленты ЛСп-Н-ТПл по технологии «Монолит-1»

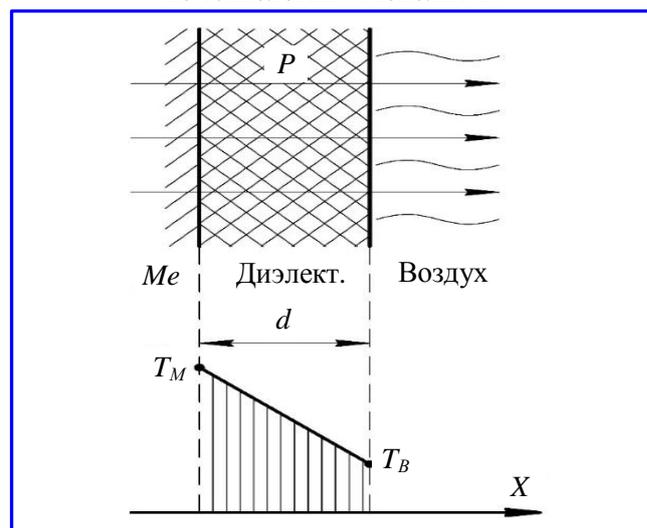


Рис. 5. Эпюра распределения температур в процессе теплопередачи через электроизоляцию: T_M , T_B – температура металла и воздуха соответственно; d – толщина электроизоляции; P – количество переданной температуры

Таблица

Характеристики и сравнительный анализ электроизоляционных лент отечественного и зарубежного производства

Материал	Толщина, дюйм/мм	Напряжение пробы, В	Класс нагревостойкости UL 94	Теплопроводность, Вт/(мК)	Тепловое сопротивление, (м ² ·°С)/Вт
Клейкие теплопроводные ленты BOND-PLY					
BERGQUIST® BOND-PLY TBP 850	0,005/0,13	3.000	V-O	0,8	0,52
	0,008/0,20	6.000			0,78
	0,011/0,28	8.500			1,01
BERGQUIST® BOND-PLY TBP 800	0,005/0,13	4.000	V-O	0,8	0,60
	0,008/0,20	6.000			0,72
Ленты слюдяные, пропитанные ЛСп-ТПл					
ЛСп-Ф/Н/С-ТПл ЛСп-Ф/Н/С-Пл ЛСп-Ф/Н/С-ТТ	0,09	4.500	F/H/C	0,75 – 0,92, в зависимости от класса нагревостойкости и типа ленты	0,17
	0,10	5.000			0,26
	0,11	5.500			0,35
	0,13	6.500			0,48
	0,15	7.000			0,57
	0,17	8.000			0,69

Компаунды КПТД-1 обеспечивают эффективный отвод тепла и электрическую изоляцию за счет повышенных теплопроводящих и диэлектрических свойств керамических наполнителей, комфортности к контактными поверхностям и выраженной термической релаксации.

Материалы не выделяют вредных веществ в процессе полимеризации и при дальнейшей эксплуатации, не вызывают коррозии металлов и сплавов, обладают хорошей адгезией к металлу, стеклу и керамике. Компаунды тяжелого наполнения могут использоваться в качестве клеящих составов при предварительном нанесении на склеиваемые поверхности подслоев (праймеров) для улучшения адгезии [4].

Заключение

Для обеспечения эксплуатационной надежности электродвигателей и генераторов, создания базового ресурса работы изоляционной системы необходимы все более совершенные материалы, обладающие высокими диэлектрическими свойствами, высокой теплопроводностью, электрической прочностью. Ремонт изоляции в обмотках статоров, заключающийся в замене стекломикаленты ЛМК-ТТ на слюдинитовую ленту марки ЛСп-Н-ТПл дает возможность значительно повысить качество изоляции обмоток статоров электрических машин. Кроме этого использование слюдинитовой ленты марки ЛСп-Н-ТПл и заливочных компаундов КПТД-1 дает возможность уменьшить омическое сопротивление, электрические потери за счет уменьшения толщины изоляции и увеличения размера площади поперечного сечения про-

вода обмотки статора, тем самым позволяет повысить коэффициент полезного действия электрических машин и надежность эксплуатации.

Литература

- Хомутов С. О. Повышение эффективности восстановления изоляции электрических двигателей на основе комплексной оценки воздействующих факторов / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев, П. И. Семичевский // Ползуновский вестник. – Барнаул : Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 2009. – № 1–2. – С. 220–229.
- Хомутов С. О. Повышение эффективности восстановления и ремонта изоляции электродвигателей в агропромышленном комплексе: специальность 05.20.02 «Электрификация сельскохозяйственного производства» : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Хомутов Станислав Олегович; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова – Барнаул, 1999. – 260 с.
- Изоляция обмоток статора электродвигателей переменного тока // Школа для электрика: [сайт]. – 2008–2024. – URL: <https://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/2517-izolyaciya-obmotok-elektricheskikh-dvigatelay.html>.
- Компаунды заливочные теплопроводящие электроизоляционные Номакон™ КПТД-1 // Номакон: [сайт]. – 2024. – URL: <https://nomacon.ru/katalog-tovarov/teplovodnyashhie-elektroizolyacionnye-materialy-kptd/kompaundy-zalivochnye-teplovodnyashhie-elektroizolyacionnye-nomakon-kptd-1.html>.

Поступила в редакцию 11.01.2024

Александр Иванович Мизин, главный технолог, т. +7 (903) 229-26-06, e-mail: aimizin@vei.ru.
(ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»).

Татьяна Игоревна Сокирко, аспирант, инженер-технолог,
т. 8 (999) 615-35-82, e-mail: tibessonova@vei.ru.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»;
ВЭИ – филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»).

INCREASING THE RESISTANCE OF ELECTRICAL INSULATION OF ELECTRIC MOTORS AND ELECTRIC GENERATORS

A. I. Mizin, T. I. Sokirko

Electric motors are involved in many complex and critical technological processes and operations; they occupy a leading position in all industrial and many transport mechanisms. Failure to operate them can lead to significant damage associated not only with the replacement or repair of failed electric motors, but also with huge losses for the enterprise due to downtime of technological equipment. This paper discusses methods for increasing the resistance of electrical insulation of electric motors and generators using the example of insulating tapes and potting compounds. Cross sections of winding insulation fragments based on glass fiber and thermosetting tapes are shown, and the advantages and disadvantages of these types of insulation are analyzed.

Key words: insulation of electrical machines, increasing the resistance of electrical insulation, thermosetting tapes, glass fiber, casting and enveloping compounds.

References

1. Khomutov S. O. Increasing the efficiency of restoration of insulation of electric motors based on a comprehensive assessment of influencing factors / S. O. Khomutov, E. V. Kobozev, P. I. Semichevsky // Polzunovsky Bulletin, 2009. – No. 1 – 2. – P. 220–229.
2. Khomutov S. O. Increasing the efficiency of restoration and repair of electric motor insulation in the agro-industrial complex: specialty 05.20.02 «Electrification of agriculture»: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Stanislav O. Khomutov; Alt. State Technical University. I. I. Polzunov Univ. – Barnaul, 1999. – 260 p.
3. Insulation of stator windings of AC electric motors // Electrician school: [website]. 2008 – 2024. – URL: <https://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/2517-izolyaciya-obmotok-elektricheskikh-dvigately.html>.
4. Heat-conducting electrical insulating filling compounds Nomakon™ KPTD-1 // Nomakon [website]. – 2024. – URL: <https://nomacon.ru/katalog-tovarov/teploprovodyashhie-elektroizolyacionnye-materialy-kptd/kompaundyzalivochnye-teploprovodyashhie-elektroizolyacionnye-nomakon-kptd-1.html>.

Alexander Ivanovich Mizin, Chief process engineer, t. +7 (903) 229-26-06, e-mail: aimizin@vei.ru.
(All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of «RFNC – VNIITF named after academician E. I. Zababakhin»).

Tatyana Igorevna Sokirko, graduate student, process engineer,
т. 8 (999) 615-35-82, e-mail: tibessonova@vei.ru.

(JSC «VNIEM Corporation»;
All-Russian Electrotechnical Institute – Branch of «RFNC – VNIITF named after academician E. I. Zababakhin»).