

*М. В. Мищенко*<sup>1</sup>, *А. Ю. Портной*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

## **ПРОЦЕССЫ СТАРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются воздействия таких эксплуатационных факторов, как влажность, температура, загрязнения и вибрация, на процесс старения изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава, которые сокращают срок службы и в конечном счете ведут к преждевременному отказу электрической машины. Представлена математическая модель механических напряжений в области выхода витков из магнитопровода главного полюса.

**Ключевые слова:** тяговый электродвигатель, электрическая изоляция, старение изоляции.

*M. V. Mishchenkov*<sup>1</sup>, *A. Yu. Portnoy*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

## **AGING PROCESSES OF ELECTRICAL INSULATION OF TRACTION ELECTRIC MOTOR WINDINGS**

**Abstract.** This article examines operational factors such as humidity, temperature, fouling process and vibration on the effects of aging of rolling stock traction motors that shorten the service life and under run conditions lead to premature failure of the electrical machine.

**Key words:** traction motor, electrical insulation, aging of insulation.

### **Введение**

Исправность изоляции – главное условие, обеспечивающее безопасность эксплуатации и надежность электрических машин.

При эксплуатации тяговых электродвигателей изоляция обмоток статора и ротора подвергается различным воздействиям (вибрационные, климатические, электрические, механические), в результате чего могут меняться параметры материалов изоляции (электрические, механические, химические), что, в свою очередь, ведет к износу, так называемому старению изоляции. Ускоренное старение изоляции сокращает срок службы электрической машины, в данном случае тягового двигателя пульсирующего тока НБ-514.

Исходя из исследований [3,8], большая часть неисправностей, приводящих к выходу из строя тяговых электродвигателей, приходится на электрическую изоляцию (короткое замыкание, межвитковое замыкание, пробой на корпус), что говорит о низком ресурсе данного узла электродвигателя. Таким образом, изоляция является наиболее уязвимым элементом в конструкции машины. Ремонтные работы по устранению неисправностей ведут к простоя локомотива, что повышает расходы средств и времени. В связи с этим проблеме продления ресурса электрической изоляции уделяется большое внимание [1,3,4].

На основе литературного обзора по материалам, применяемым в качестве изоляции, можно сказать, что основополагающими свойствами в выборе изоляции являются диэлектрическая прочность и нагревостойкость, а механической прочности в реальных динамических условиях уделено мало внимания. Кроме того, в настоящее время существует достаточно мало исследований [1,5,6] в части рассмотрения проблемы устойчивости изоляции в условиях внешних загрязнений, малоцикловой и многоцикловой усталости изоляции и устойчивости изоляции в условиях повышенных вибраций.

Следует также обратить внимание на исследования, описывающие особенности разрушения изоляции в области выхода проводника из магнитопровода. Важно заметить, что

подобным образом устроена и компенсационная обмотка тяговых электродвигателей пульсирующего тока серии НБ-514 и его модификации НБ-514Б.

### **Материалы, применяемые для электрической изоляции тяговых электродвигателей**

В тяговых электродвигателях (на примере НБ-514) применяются следующие типы изоляции и их комбинации [7]: слюдинитовая лента, бумага асбестовая, фторопластовая пленка, стеклолента, электронит. А в качестве пропитки катушек используется эпоксидный компаунд.

Рассмотрим более подробно изоляцию, применяемую в тяговых электродвигателях серии НБ-514 и его модификациях.

Корпусная изоляция катушек главного полюса представляет собой пять слоев слюдинитовой ленты толщиной 0,13 мм, а межвитковой изоляцией служит асбестовая бумага толщиной 0,3 мм, наложенная в два слоя. После наложения слои пропитываются эпоксидным компаундом.

Катушка добавочных полюсов изготавливается из двух параллельных проводников медной ленты марки ЛММ размером 2,44x35 мм и имеет пять витков. Обмотки корпусной изоляции состоят из пяти слоев слюдинитовой ленты толщиной 0,1 мм и одного слоя фторопластовой пленки толщиной 0,02 мм. Покровная изоляция представляет собой один слой стеклоленты толщиной 0,1 мм, а межвитковая изоляция – один слой электронита толщиной 0,5 мм.

Компенсационная обмотка состоит из шести отдельных катушек; каждая катушка имеет по семь витков. Располагается данная обмотка в пазах главных полюсов. Намотка компенсационной катушки производится из медной ленты марки ЛММ размером 3,53x35 мм. Корпусная изоляция состоит из четырех слоев слюдинитовой ленты толщиной 0,1 мм и одного слоя фторопластовой пленки толщиной 0,02 мм. Покровная изоляция представляет собой один слой стеклоленты толщиной 0,2 мм, наложенной с перекрытием в половину ширины ленты. Витковая изоляция включает один слой слюдинитовой ленты толщиной 0,1 мм, наложенный с перекрытием в половину ширины ленты.

Пропитка изоляции катушек добавочных полюсов и компенсационной обмотки производится эпоксидным компаундом, после чего катушки монтируются в остов электродвигателя и сушат в течение 7 ч при токе 700 А.

Обмотка якоря состоит из 87 якорных катушек и 58 катушек уравнивателей, концы которых приварены к петушкам коллектора. Обмотка якоря в пазах сердечника закреплена клиньями из профильного стеклопластика толщиной 5 мм, а лобовые части обмотки – стеклобандажом.

Каждая катушка якоря состоит из четырех элементарных проводников, расположенных в пазу плашмя и выполненных из обмоточного провода марки ПЭТВСДТ размером 3,55x7,1 мм. Корпусная изоляция якорных катушек выполнена из четырех слоев слюдинитовой ленты толщиной 0,08 мм, наложенных с перекрытием в половину ширины ленты, и одного слоя фторопластовой пленки толщиной 0,02 мм, наложенной с перекрытием в четверть ширины ленты. Покровная изоляция представлена одним слоем стеклоленты толщиной 0,1 мм, наложенной встык.

### **Климатические воздействия, нагрев и загрязнения**

В процессе эксплуатации обмотки тяговых электродвигателей работают в достаточно большом температурном диапазоне от -40 \*С и до +130\*С, где нижний порог обусловлен зимними условиями, когда холодные потоки воздуха попадают во внутреннюю часть электродвигателя через систему вентиляции, а верхний порог достигается в процессе работы электродвигателя в летних жарких условиях и/или при повышенной нагрузке. При этом, если электродвигатель снаружи находится под воздействием низких температур, а в области вентиляционного выхода воздух нагревается, т.е. происходит резкий перепад температур, то

во внутренних частях электродвигателя, в том числе и на изоляции, начинает конденсироваться влага. Так как изоляция имеет капиллярно-пористую структуру, то происходит процесс поглощения изоляцией влаги, что ведет к снижению диэлектрической прочности. Данное явление описано в работах [2].

На данный момент рассматривается следующая гипотеза: в случае увлажнения изоляции после остановки электродвигателя на достаточно длительный промежуток времени в условиях низких температур происходит замерзание частиц воды в капиллярах изоляции. При кристаллизации частиц воды происходит увеличение объема, что, в свою очередь, создает напряжение внутри изоляции, и при циклической разморозке-заморозке образуются микротрещины, что также снижает диэлектрическую прочность.

Кроме того, в работе [9] приведены результаты исследования катушек турбогенераторов, изоляция которых изготовлена на основе эпоксидных компаундов. Авторы провели испытания эпоксидно-сланцевой изоляции при воздействии нескольких нагрузок, в том числе тепловой. Установлено, что старение изоляции катушек турбогенераторов в основном обусловлено циклическими тепловыми нагрузками, связанными с пусками и остановками машины. В табл.1 приведено остаточное пробивное напряжение изоляции турбогенераторов [9].

**Таблица 1. Остаточное пробивное напряжение изоляции турбогенераторов**

Характеристика режима	Номер генератора				
	1	2	3	4	5
Номинальная мощность, МВт	175	156	75	75	66
Номинальное напряжение, кВ	18	18	13,8	13,2	13,2
Количество пусков/остановов	207	213	3050	4219	5565
Наработка, ч	110 000	125 424	100 535	100 889	103 637
Среднее значение остаточного пробивного напряжения, %*	83,0 (4,4)	85,6 (5,3)	71,1 (8,8)	68,5 (12,3)	63,5 (6,4)
Расстояние до места пробоя, %**	100/0	71/29	25/75	0/100	0/100

\*В скобках – стандартное отклонение.

\*\*В числителе – пробой внутри паза, в знаменателе – вне.

Помимо воздействия температуры и влаги, на изоляцию также могут оказывать влияние загрязнения. Загрязнения оседают на поверхности изоляции в виде пыли. В состав пыли, вероятно, входит и мелкодисперсное железо, являющееся хорошим проводником электрического тока. Основным источником мелкодисперсного железа являются трущиеся элементы механизмов, например, трение колесной пары о рельс. Образовавшаяся пыль втягивается воздушным потоком в вентиляционную систему и оседает, помимо прочего, на электрической изоляции, что оказывает влияние на такие параметры, как пробивное напряжение, сопротивление и диэлектрическая прочность.

### **Механические напряжения в изоляции. Воздействия вибраций.**

Стоит полагать, что основным источником вибрационного шума является якорь с оборотной частотой, а также частотами кратными или дробными оборотным в случаях дефектов, например, при дисбалансе якоря. Кроме того, вибрационный шум может быть вызван вибрациями, производимыми электромагнитными силами на частоте питающей сети и двойной частоте сети. Но стоит также обратить внимание на элементы электронного регулирования тяговым электродвигателем, а именно на такие устройства, как выпрямительно-инвертирующий преобразователь (ВИП) и выпрямительная установка

возбуждения (ВУВ). Данные устройства имеют зонно-фазовое регулирование напряжения и являются источниками высокочастотных гармоник.

Вибрацию электрической природы вызывают электромагнитные силы между обмотками якоря электродвигателя, создаваемые токами, протекающими через них. Такие вибрации особенно выражены в режиме тяги и при сильной нагрузке на тяговый электродвигатель.

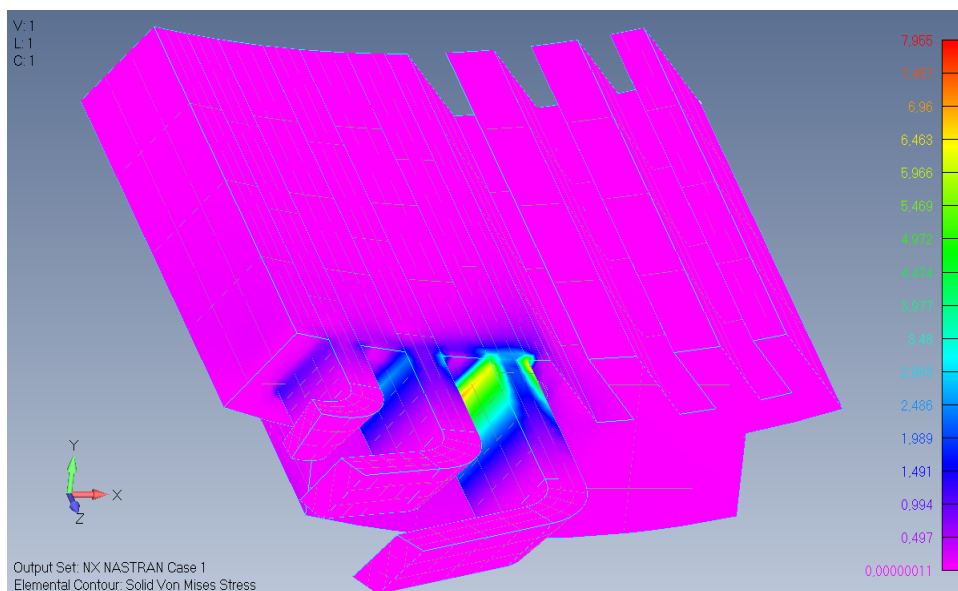
Стоит обратить внимание и на особенность конструкции компенсационной обмотки главного полюса тяговых электродвигателей. Конструкция обмотки представляет собой отдельные витки, не связанные между собой, вставленные в пазы главных полюсов магнитопровода электродвигателя. Если рассматривать выход витка из магнитопровода, то он представляет собой своего рода консольное закрепление. Область выхода витка из магнитопровода является концентратором механических напряжений. Фотография главного полюса с компенсационной обмоткой представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Витки компенсационной обмотки в пазах главного полюса**

Для наглядного представления механических напряжений в области выхода компенсационной обмотки из магнитопровода в САД-системе была создана трехмерная модель главного полюса с компенсационной обмоткой и импортирована в среду для проведения анализа методом конечных элементов. Посредством математического моделирования с использованием метода конечных элементов смоделировано условное внешнее воздействие на торец компенсационной обмотки в районе выхода из магнитопровода. Воздействие представляет собой равномерно распределённую нагрузку. Модель с распределением механических напряжений представлена на рис. 2.

Как видно из рис. 2, распределение механических напряжений в витках компенсационной обмотки лежит в области выхода последних из магнитопровода главного полюса. Постоянное воздействие вибрационных нагрузок с постоянными перепадами температур в данной области в конечном счете может приводить к преждевременному старению изоляции.



**Рис. 2. Механические напряжения в области выхода витков из магнитопровода**

### **Заключение**

В данной работе рассматриваются материалы, применяемые в тяговых электродвигателях (на примере НБ-514), а также процессы, происходящие при различных воздействиях на электрическую изоляцию. Выдвинута гипотеза о кристаллизации частиц воды в капиллярно-пористой структуре изоляции при низких температурах, и, как следствие, возникновении дополнительных напряжений в слое электрической изоляции. Создана математическая модель, демонстрирующая механические напряжения в области выхода витков компенсационной обмотки из магнитопровода главного полюса.

Таким образом, электроизоляционные материалы, применяемые в катушках тяговых электродвигателей, подвержены целому ряду факторов, таких как влага, температура, загрязнения и вибрация. Данные факторы приводят к преждевременному старению изоляции и должны рассматриваться как комплексная проблема в области повышения надежности электрической изоляции.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Исмаилов Ш. К., Смирнов В. П., Худоногов А. М. Кинетика процесса тепло- и влагообмена в изоляции обмоток тяговых электрических машин. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2008. № 9. С. 35-42.
2. Корявин А. Р. Проблемы выбора внешней изоляции для работы в условиях загрязнения. Электричество. 2017. № 4. С. 22-30.
3. Кравченко Г. А., Макаров А. М., Михайлов А. А., Смирнова М. Ю. Процессы старения электрической изоляции. Наука через призму времени. 2019. № 6 (27). С. 40-42.
4. Маслов В. А., Гроздов А. Г., Панов А. А., Пацино А. В. Химстойкость электроизоляционного эпоксиизоцианатного компаунда. Электротехника. 2010. № 12. С. 40-42.
5. Минакова Т. Е. Динамика старения изоляции электрических машин [Электронный ресурс] // Nauka-rastudent.ru. 2015. № 11 (23). URL: <http://nauka-rastudent.ru/23/3048/> (дата обращения 10.05.2021).
6. Рыбаков Л. М., Белов В. В., Макарова Н. Л., Овчукова С. А., Захватаева А. О., Кириллов Н. К., Зайцев П. В. Анализ причин выхода из строя трансформаторов 110 кВ и методы их диагностирования. Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2018. №2 (49). С.124-127. DOI 10.12737/article\_5b350932963a26.64641811
7. Электровоз ВЛ85 : руководство по эксплуатации / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарев, Л. А. Позднякова [и др.]. – М. : Транспорт, 1992. – 480 с.

8. Fofana I., Borsi H., Gockenbach E., Farzaneh M. Aging of transformer insulating materials under selective conditions. European Transactions on Electrical Power. 2007. Vol. 17. No. 5. Pp. 450-470. DOI:10.1002/etep.134

9. Какe Y., Kadotani K., Kenjo S., Hirabayashi S., Tani T., Natsume F. Multi-stress degradation of insulation systems for high voltage rotating machines. Доклад 15-02 на сессии СИГРЭ 1982 г. Пер. с англ. Э. М. Попова.

#### REFERENCES

1. Ismailov Sh. K., Smirnov V. P., Khudonogov A. M Kinetics of the process of heat and moisture exchange in insulation of windings of traction electric machines. Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering. 2008. No. 9. S. 35-42.

2. Koryavin A. R. Problems of choosing external insulation for work in conditions of pollution. Electricity. 2017. No. 4. P. 22-30.

3. Kravchenko G. A., Makarov A. M., Mikhailov A. A., Smirnova M. Yu. Processes of electrical insulation aging. Science through the prism of time. 2019. No. 6 (27). S. 40-42.

4. Maslov V. A, Grozdov A. G, Panov A. A, Patsino A.V. Chemical resistance of electrical insulating epoxyisocyanate compound. Electrical engineering. 2010. No. 12. P. 40-42.

5. Minakova T. E. Dynamics of aging of insulation of electrical machines [Electronic resource] // Nauka-rastudent.ru. 2015. No. 11 (23). URL: <http://nauka-rastudent.ru/23/3048/> (date of access May 10, 2021).

6. Rybakov L. M., Belov V. V., Makarova N. L., Ovchukova S. A., Zakhvataeva A. O., Kirillov N. K., Zaitsev P. V. Analysis of the causes of failure of transformers 110 kV and methods for their diagnosis. Bulletin of Kazan State Agrarian University. 2018. No. 2 (49). Pp. 124-127. DOI 10.12737 / article\_5b350932963a26.64641811

7. Electric locomotive VL85: operation manual / B. A. Tushkanov, N. G. Pushkarev, L. A. Pozdnyakova [and others]. - M.: Transport, 1992. -- 480 p.

8. Fofana I., Borsi H., Gockenbach E., Farzaneh M. Aging of transformer insulating materials under selective conditions. European Transactions on Electrical Power. 2007. Vol. 17. No. 5. Pp. 450-470. DOI:10.1002/etep.134

9. Какe Y., Kadotani K., Kenjo S., Hirabayashi S., Tani T., Natsume F. Multi-stress degradation of insulation systems for high voltage rotating machines. Report 15-02 at the 1982 CIGRE session. from English E. M. Popova.

#### Информация об авторах

*Мищенко Максим Вальдемарович* – аспирант кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: reydensp@mail.ru

*Портной Александр Юрьевич* – д.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: portnoyalex@yandex.ru

#### Authors

*Maxim Voldemarovich Mishchenkov* – Post-graduate student, Department «Physics, Mechanics and Instrumentation», Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, e-mail: reydensp@mail.ru

*Alexander Yurievich Portnoy* – Doctor of Ph. D., Associate Professor of the Department «Physics, Mechanics and Instrumentation», Irkutsk state University of Railway transport, Irkutsk, e-mail: portnoyalex@yandex.ru

#### Для цитирования

Мищенко М.В. Процессы старения электрической изоляции обмоток тяговых электродвигателей [Электронный ресурс] / М. В. Мищенко, А. Ю. Портной // Молодая

наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2021. — №12. — Режим доступа: <http://mnv.ircups.ru/toma/121-2021>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус., англ. (дата обращения: 07.06.2021)

**For citation**

Mishchenkov M.V., Portnoy A. Yu. *Aging processes of electrical insulation of traction electric motor windings. Molodaya nauka Sibiri: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2021, no. 12. [Accessed 07/06/21]