

УДК 621.3.048

Оценка влияния факторов на электроосмотическую сушку увлажненной изоляции коллекторных тяговых электрических двигателей электровозов

С. В. Живушко, Е. А. Третьяков, О. В. Гателюк

Омский государственный университет путей сообщения, Россия, 644046, Омск, пр. Маркса, 35

Для цитирования: Живушко С. В., Третьяков Е. А., Гателюк О. В. Оценка влияния факторов на электроосмотическую сушку увлажненной изоляции коллекторных тяговых электрических двигателей электровозов // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 17–26. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-17-26

Аннотация

Цель: определить влияние воздействующих факторов на скорость электроосмотической сушки увлажненной изоляции обмоток тягового электрического двигателя постоянного тока. **Методы:** экспериментальный. Обработка результатов эксперимента осуществлялась методами математической статистики. **Результаты:** проведены две серии экспериментов электроосмотической сушки увлажненной изоляции тягового электрического двигателя постоянного тока при различных значениях факторов напряжения и емкости С-фильтра. Получена выборка из 60 значений сопротивлений изоляции главных полюсов ТЭД (по 30 в каждой серии). Проведен регрессионный анализ результатов. Величина достоверности аппроксимации составила 0,996 по напряжению и 0,804 по емкости С-фильтра. Подтверждена однородность экспериментальных данных критерием Вилкоксона. Проведен двухфакторный дисперсионный анализ для связанных выборок. Результат: факторы напряжения и емкости С-фильтра по отдельности оказывают значительное влияние на скорость электроосмотической сушки. Факторы индивидуального различия и различия выборок оказались незначимыми. Увеличение напряжения электроосмотической сушки от 500 до 2500 В повышает сопротивление изоляции главных полюсов в квадратичной зависимости на 210%, а уменьшение коэффициента пульсаций от 0,2 до 0,04 снижает сопротивление изоляции на 45%. **Практическая значимость:** полученные данные могут использоваться для разработки технологии электроосмотической сушки ТЭД в условиях сервисного депо в период отрицательных температур.

Ключевые слова: подвижной состав, тяговый электрический двигатель, обмотка, изоляция, увлажнение, сушка, электроосмос, регрессионный анализ, ранговый метод, критерий Вилкоксона, двухфакторный дисперсионный анализ, несвязанная выборка

Введение

Изоляционные материалы тяговых электродвигателей взаимодействуют с окружающей средой, что при определенных условиях приводит к их увлажнению. Влага из окружающей среды попадает на поверхность и внутрь многослойного изоляционного материала и путем диффузии распространяется внутри структуры [1]. Для тяговых электрических двигателей

(ТЭД) проблема увлажнения изоляции обмоток является актуальной. В период отрицательной температуры окружающей среды при снижении температуры нагретых ТЭД происходят конденсация воздуха и образование водяной пленки на поверхности изоляции обмоток, что приводит к снижению сопротивления изоляции и ухудшению коэффициента абсорбции. Указанные процессы могут происходить во

время движения поезда, стоянки в ожидании работы, а также при установке на ремонтные стойла для сервисного обслуживания.

На рис. 1 представлен пример снижения сопротивления изоляции ТЭД 3-4 ниже допустимого значения на электровозе 2ЭС6 при эксплуатации в декабре 2024 года.

Для повышения сопротивления изоляции в условиях сервисного обслуживания в период отрицательных температур применяют калориферные стационарные или передвижные установки, токовую сушку [2, 3]. Указанные методы сушки требуют значительных затрат времени и электрической энергии.

В статье [4] авторы предлагают рациональное использование электрической энергии за счет применения широтно-импульсного регулирования подачи горячего воздуха в полость ТЭД. При этом обмотки подвергаются нагреву, который приводит к негативным последствиям для изоляции, образуются микротрещины.

В работах [5, 6] предлагается электроосмотический способ проведения сушки (ЭОС) асинхронных электрических машин без нагрева изоляции при напряжении 350–650 В.

Способ тестировался на изоляции трехфазных асинхронных двигателей напряжением 380 В, используемых в сельском хозяйстве.

В ходе проведенных авторами экспериментов по оценке эффективности ЭОС коллекторных ТЭД 810-й серии в условиях сервисного локомотивного депо между обмотками и корпусом прикладывалось пульсирующее напряжение величиной 1500–2500 В [7, 8]. В результате исследований показано, что электроосмотическая сушка совместно с калориферной приводит к повышению эффективности процесса путем уменьшения времени восстановления сопротивления увлажненной изоляции обмоток ТЭД до заданного значения более чем в два раза. При этом не выполнялась оценка влияния степени сглаживания пульсирующего напряжения и амплитуды напряжения (далее — факторы) на эффективность ЭОС.

Настоящее исследование посвящено оценке влияния уровня напряжения, а также степени сглаживания переменной составляющей пульсирующего напряжения на интенсивность ЭОС увлажненной изоляции ТЭД.

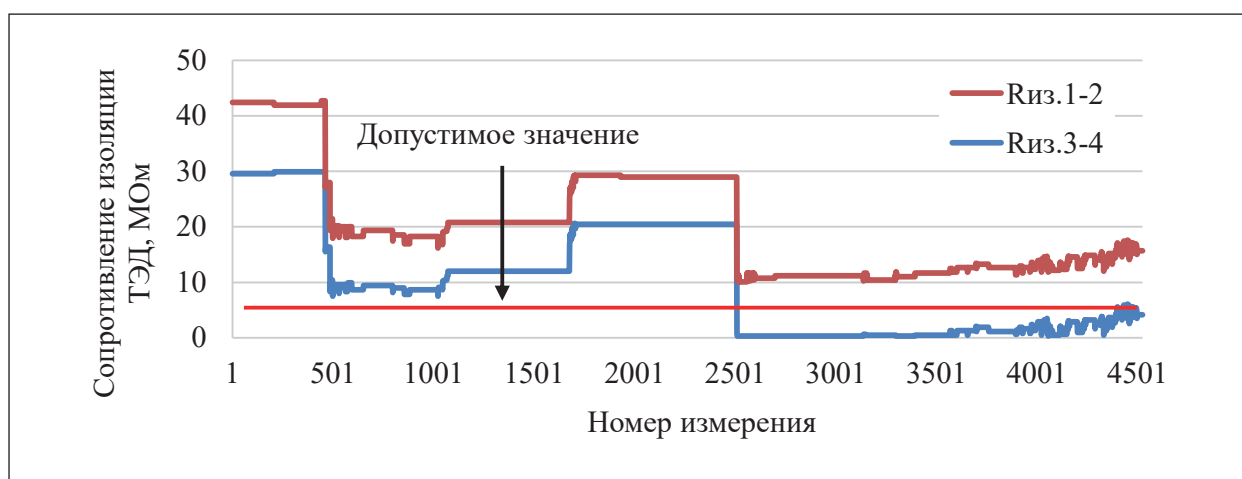


Рис. 1. Сопротивление изоляции обмоток ТЭД 1-2 и ТЭД 3-4 во время поездки 2ЭС6 №358 (показания сняты с регистратора параметров электровоза 17 декабря 2024 года)

Основная часть

Цель исследования — определить влияние рассматриваемых факторов на скорость ЭОС увлажненной изоляции обмоток ТЭД постоянного тока.

Использовался экспериментальный метод. Обработка результатов эксперимента осуществлялась методами математической статистики.

Объект исследования — изоляция главных полюсов (ГП) ТЭД 810-й серии электровоза 2ЭС6.

Материалы и методы

Интенсивность ЭОС увлажненной изоляции ТЭД определялась по величине конечного сопротивления изоляции обмотки ГП после 6 часов указанной сушки с начального сопротивления увлажненной изоляции 200–300 кОм. Сглаживание переменной составляющей пульсирующего напряжения ЭОС изменялось путем задания нескольких вариантов емкости С-фильтра (0, 2, 4, 6, 10 мкФ), которые соответствовали коэффициенту пульсаций по напряжению 0,2–0,04.

Во время эксперимента влажность окружающей среды составляла 70%, температура 23 °С.

Характеристики изоляции до и после увлажнения, а также в конце ЭОС: сопротивление изоляции после 600 с ($R_{из.600}$); коэффициент абсорбции ($K_{абс}$), коэффициент поляризации ($K_{пол}$) измерялись цифровым мегаомметром Е6-31. Емкость изоляции ($C_{из}$) измерялась промышленным измерителем FLUK 124. Ток утечки и напряжение ЭОС непосредственно во время эксперимента снимались вольтметром и амперметром. Форма напряжения регистрировалась цифровым осциллографом Tektronix TBS1052B-EDU. Обработка данных происходила в пакете Office Excel, в котором применя-

лись встроенные функции для расчета статистических критериев.

Проведение эксперимента

Исследование влияния факторов осуществлялось в следующей последовательности. Изоляция обмоток ГП ТЭД 810-й серии увлажнялась до значения сопротивления изоляции 200–300 кОм парогенератором Grandmaster, подключались мегаомметр Е6-31 и промышленный измеритель Fluke 124. После этого подключалась установка ЭОС (разработана авторами), при этом положительный потенциал подключался к обмоткам ГП ТЭД, а отрицательный — к корпусу ТЭД. Степень сглаживания выходного напряжения изменялась с помощью емкости выходного С-фильтра (фактор А). Величина выходного напряжения (фактор Б) регулировалась автотрансформатором на низкой стороне трансформатора ОЛ-1,25/10-0,22У1. Эксперименты проводились в ручном режиме на одном ТЭД. Структурная схема реализации ЭОС приведена на рис. 2.

Формы напряжений на выходе установки ЭОС, подключенной к ТЭД, приведены на рис. 3.

Эксперимент проводился в течение 6 часов с двумя повторениями. В данный промежуток времени записывались ток утечки и напряжение сушки, по которым определялось сопротивление в момент сушки. Каждые 10 минут записывались промежуточные значения сопротивления. По окончании времени сушки к изоляции обмоток ГП подключались мегаомметр и промышленный измеритель.

До увлажнения изоляции ТЭД показатели были следующие: $R_{из.600} = 250$ МОм; $K_{абс} = 1,85$; $K_{пол} = 1,41$; $C_{из} = 0,014$ мкФ.

Результаты эксперимента для анализа влияния двух факторов (напряжение и емкость С-фильтра) на конечное сопротивление

изоляции ГП ТЭД через 6 часов ЭОС представлены в табл. 1.

Регрессионный анализ и анализ однородности

На основе результатов эксперимента построены графики регрессии и выполнена аппроксимация данных встроенными средствами Excel (рис. 4). Величина достоверности аппроксимации (R^2) составила 0,996 по напряжению (рис. 4, а) и 0,804 по емкости С-фильтра (рис. 4, б).

На следующем этапе выполнена проверка нулевой гипотезы $F_1(x) = F_2(x)$ об однород-

ности выборок n_1 и n_2 (табл. 2) с помощью критерия Вилкоксона [9] при альтернативной гипотезе $F_1(x) \neq F_2(x)$, поскольку объем выборок n_1 и n_2 больше 25. В нашем случае в двух повторениях эксперимента выборка содержала по 30 значений. Достоинство этого критерия заключается в том, что он применим к случайным величинам, распределения которых неизвестны. Требуется лишь, чтобы величины были непрерывными.

Значения из табл. 2 располагаются в виде одного вариационного ряда табл. 3. Из этого ряда определяется сумма порядковых номеров ($W_{\text{набл}}$) (рангов) первой и второй выборки.

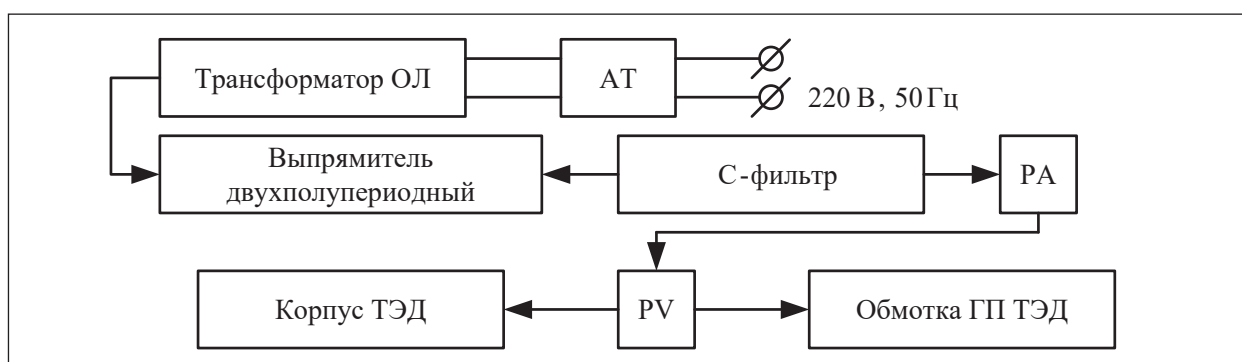
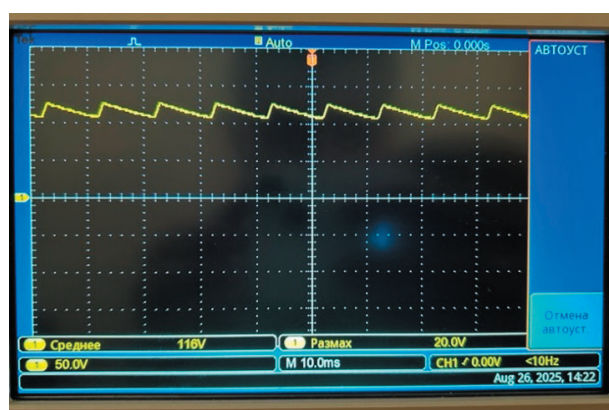
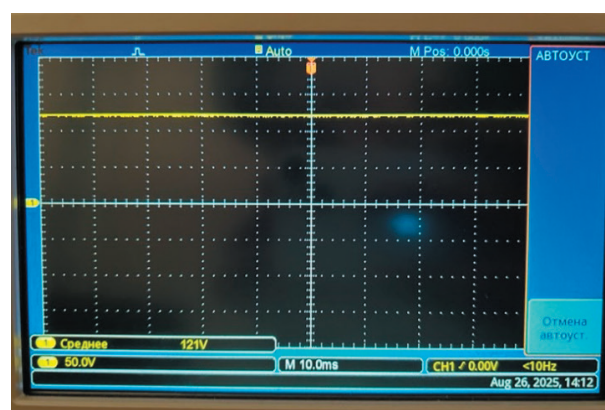


Рис. 2. Структурная схема установки ЭОС:

АТ — автотрансформатор; РА — амперметр; PV — вольтметр



а



б

Рис. 3. Формы напряжения на выходе устройства ЭОС: а — несглаженное (коэффициент пульсаций 0,2); б — сглаженное (емкость фильтра 10 мкФ, коэффициент пульсаций 0,04)

ТАБЛИЦА 1. Сопротивление электрической изоляции ТЭД 810-й серии после ЭОС, МОм

		Фактор А					
		C = 0 мкФ	C = 2 мкФ	C = 4 мкФ	C = 6 мкФ	C = 8 мкФ	C = 10 мкФ
Фактор Б	U = 500 В	10,6	7,5	3,6	2,7	2,4	2,7
		11,5	4,5	6,5	3,8	3,5	2,8
	U = 1000 В	15,7	7,8	10,5	8,6	5,5	3,8
		13,5	5,8	7,3	6,5	5,1	5,5
	U = 1500 В	19,8	9,8	11,2	11,8	7,5	6,7
		17,5	8,5	11,5	10,7	8,9	7,1
	U = 2000 В	22,3	14,6	18,1	11,4	12,3	13,5
		18,6	12,8	19,3	13,5	11,5	14,0
	U = 2500 В	28,1	21,3	24,3	19,7	17,8	20,1
		33,1	23,3	22,5	19,8	22,4	17,6

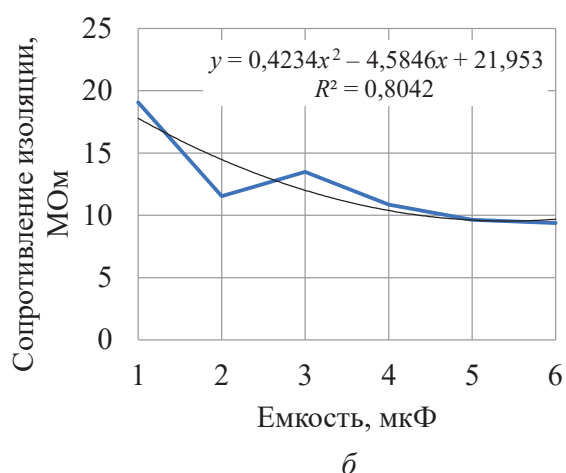
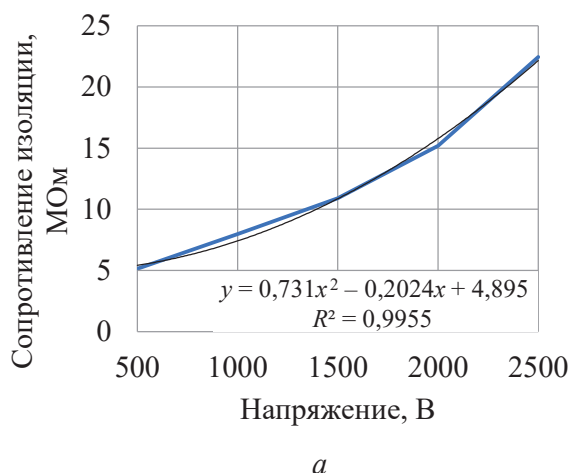


Рис. 4. Регрессионный анализ зависимости сопротивления изоляции в результате ЭОС от напряжения (а) и емкости С-фильтра (б)

Для одинаковых значений используются средние ранги.

Сумма рангов по табл. 3 для первой выборки $W_{набл.1} = 920$, а для $W_{набл.2} = 910$.

В результате проведения ранжирования и вычисления суммы рангов выборки получаем наблюдаемое значение критерия Вилкоксона с меньшей суммой $W_{набл} = 910$. Нижнее критическое значение критерия ($W_{ниж.кр}$) при

уровне значимости $\alpha = 0,05$ находится по формуле:

$$W_{ниж.кр} \left(\frac{\alpha}{2}; n_1; n_2 \right) = \left[\frac{(n_1 + n_2 + 1)n_1 - 1}{2} - z_{кр} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \right], \quad (1)$$

ТАБЛИЦА 2. Выборка для анализа однородности по критерию Вилкоксона, МОм

Выборка 1 (n_1)						Выборка 2 (n_2)					
10,6	7,5	3,6	2,7	2,4	2,7	11,5	4,5	6,5	3,8	3,1	2,8
15,7	7,8	10,5	8,6	5,5	3,8	13,5	5,8	7,3	6,5	5,1	5,5
17,5	8,5	11,3	10,7	8,9	7,1	17,5	8,5	11,3	10,7	8,9	7,1
18,6	12,8	19,3	13,5	11,5	14	18,6	12,8	19,3	13,5	11,5	14
33,1	23,3	22,5	19,8	22,4	17,6	33,1	23,3	22,5	19,8	22,4	17,6

ТАБЛИЦА 3. Ранжированный ряд, МОм (n_1 — серые ячейки, n_2 — белые ячейки)

Ряд	2,4	2,7	2,7	2,8	3,1	3,6	3,8	3,8	4,5	5,1	5,5	5,5
Ранг	1	2,5	2,5	4	5	6	7,5	7,5	9	10	11,5	11,5
Ряд	5,8	6,5	6,5	7,1	7,1	7,3	7,5	7,8	8,5	8,5	8,6	8,9
Ранг	13	14,5	14,5	16,5	16,5	18	19	20	21,5	21,5	23	24,5
Ряд	8,9	10,5	10,6	10,7	10,7	11,3	11,3	11,5	11,5	11,5	12,8	12,8
Ранг	24,5	26	27	28,5	28,5	30,5	30,5	33	33	33	35,5	35,5
Ряд	13,5	13,5	13,5	14	14	15,7	17,5	17,5	17,6	17,6	18,6	18,6
Ранг	38	38	38	40,5	40,5	42	43,5	43,5	45,5	45,5	47,5	47,5
Ряд	19,3	19,3	19,8	19,8	22,4	22,4	22,5	22,5	23,3	23,3	33,1	33,1
Ранг	49,5	49,5	51,5	51,5	53,5	53,5	55,5	55,5	57,5	57,5	59,5	59,5

где $z_{кр}$ находится с помощью равенства:

$$\Phi(z_{кр}) = (1 - \alpha)/2, \quad (2)$$

а верхнее критическое значение ($W_{верх.кр}$) по формуле:

$$W_{верх.кр} \left(\frac{\alpha}{2}; n_1; n_2 \right) = (n_1 + n_2 + 1)n_1 - \\ - W_{нижн.кр} \left(\frac{\alpha}{2}; n_1; n_2 \right). \quad (3)$$

В результате при уровне значимости $\alpha = 0,05$ по формулам (1), (2), (3) получаем:

$$W_{нижн.кр1} = 883; W_{нижн.кр2} = 947.$$

Поскольку выполняется неравенство:

$$W_{нижн.кр1} < W_{набл} < W_{нижн.кр2}, \quad (4) \\ 883 < 910 < 947,$$

то можно сделать вывод о том, что нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу об однородности выборок.

Двухфакторный дисперсионный анализ

Поскольку возможно влияние взаимодействующих факторов между собой, то следует применить дисперсионный анализ с целью выбора наиболее значимых факторов и их взаимодействия для оценки влияния на исследуемый процесс с помощью двухфакторного дисперсионного анализа для связанных выборок [10]. Проанализируем действие двух факторов на две группы измерений при одинаковых факторах. Для этого были проверены четыре нулевые статистические гипотезы:

1. Фактор напряжения в процессе ЭОС не влияет на сопротивление изоляции.

2. Фактор емкости С-фильтра в процессе ЭОС не влияет на сопротивление изоляции.

3. Влияние фактора напряжения одинаково при различных значениях фактора емкости С-фильтра.

4. Влияние фактора различия выборок на сопротивление изоляции.

Определены критические значения критерия F Фишера:

$F_{U_{кр}} = 171,9; F_{C_{кр}} = 76,9; F_{И_{кр}} = 2,12; F_{UC_{кр}} = 4,35$ для сопоставления с эмпирическими значениями. Решение о принятии или отвержении гипотезы принимается по условию [10]:

$F_U < F_{U_{кр}}; F_C < F_{C_{кр}}; F_{И} > F_{И_{кр}}; F_{UC} < F_{UC_{кр}}$.

В результате вычислений получены следующие наблюдаемые и критические значения при уровне значимости α , которые сведены в табл. 4.

Из результатов выполненного двухфакторного дисперсионного анализа следует, что факторы напряжения и емкости С-фильтра по отдельности значительно влияют на ЭОС изоляции ТЭД, при этом взаимодействие факторов оказалось незначимым, то есть факторы не зависят друг от друга. Фактор различия выборок также оказался незначимым.

Результаты и обсуждение

Согласно регрессионной модели, установлено, что величина напряжения ЭОС оказывает большее влияние на выведение влаги из сло-

ев изоляции ТЭД, нежели емкость С-фильтра на выходе устройства ЭОС.

Однородность выборки была оценена с помощью критерия Вилкоксона, который показал, что нулевую гипотезу об однородности выборки $F_1(x) = F_2(x)$ нет оснований отвергать. Это показывает, что эксперимент был выполнен без нарушений.

С помощью двухфакторного дисперсионного анализа для связанных выборок было проанализировано действие двух факторов на две группы измерений. Были проверены четыре нулевые статистические гипотезы, в результате чего было выявлено, что на сопротивление изоляции влияют только изменение факторов напряжения и емкости С-фильтра. Взаимодействие факторов и фактор различия выборок значимо не влияют на конечное сопротивление изоляции.

Выводы

Из результатов проведенного исследования по оценке влияния величины выходного пульсирующего напряжения и степени его сглаживания с помощью С-фильтра на эффективность ЭОС следует, что с увеличением напряжения ЭОС от 500 до 2500 В сопротивление изоляции ГП ТЭД на момент окончания ЭОС увеличивается в квадратичной зависимости на 210%, а с уменьшением коэффициента пульсации от 0,2 до 0,04 снижается на 45%. Это объясняется уравнением Гельмгольца — Смолуховского, связывающим скорость движения молекул жидкости с напряженностью электрического поля [11].

ТАБЛИЦА 4. Результаты вычислений двухфакторного дисперсионного анализа

Факторы	$F_{эмп}$	α	$F_{кр}$	H_0	Значимость фактора
1. Фактор U	173,3	0,00001	171,9	Отвергается	Значим
2. Фактор C	100,1	0,00001	76,9	Отвергается	Значим
3. Взаимодействие факторов	1,21	0,05	2,12	Принимается	Незначим
4. Фактор различия выборок	0,06	0,05	4,35	Принимается	Незначим

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что они могут использоваться для разработки технологии ЭОС ТЭД в условиях сервисного депо, что позволит сократить время сушки и повысить конечное сопротивление изоляции ГП.

Научный интерес представляет также вопрос оценки эффективности ЭОС с импульсной формой выходного напряжения, что является темой дальнейших исследований авторов.

Список источников

1. Вайда Д. Исследования повреждений изоляции. М.: Энергия, 1968. 400 с.
2. Сравнительная оценка различных способов сушки изоляции обмоток электродвигателей / А. Е. Немировский [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2022. Т. 25, №4. С. 354–364.
3. Исследование существующих методов сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей локомотива / М. Ю. Хажеева [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2024. Т. 21, №2. С. 508–516.
4. Орлова М. А., Дульцева Е. В. Совершенствование технологии сушки тяговых двигателей электровозов // Молодежная наука: труды XXVI Всероссийской студенческой научно-практической конференции КриЖТ ИрГУПС (Красноярск, 22 апреля 2022 года). Т. 2. Красноярск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2022. С. 244–249.
5. Немировский А. Е., Кичигина Г. А., Сергиевская И. Ю. Электроосмотическая сушка и влагозащита электрооборудования // Федоровские чтения — 2017: XLVII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 15–17 ноября 2017 года). М.: ИД МЭИ, 2017. С. 166–170.
6. Способ электроосмотической сушки изоляции обмоток электрических машин: патент №2174280 Российская Федерация, МПК H02K 15/12 15/00. №2000132540/09 / Мороз Н. К., Немировский А. Е., Симаков К. П.; заявл. 26.12.2000; опубл. 27.09.2001. 7 с.
7. Третьяков Е. А., Балагин О. В., Живушко С. В. Повышение эксплуатационной надежности электровозов за счет снижения увлажненности изоляции тяговых электродвигателей на основе электрокинетических явлений // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2023. Т. 82, №3. С. 236–245.
8. Результаты испытаний сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей электровозов на основе электрокинетических явлений в условиях депо / Е. А. Третьяков [и др.] // Транспорт Урала. 2023. №2 (77). С. 92–96.
9. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
10. Сидоренко Е. В. Методы математической обработки в психологии. СПб.: Речь, 2004. 350 с.
11. Щукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия: учеб. для вузов. 7-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2025. 444 с.

Дата поступления: 20.10.2025

Решение о публикации: 18.01.2026

Контактная информация:

ЖИВУШКО Сергей Владиславович — аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог»; s.zhivushko@yandex.ru

ТРЕТЬЯКОВ Евгений Александрович — д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог»; eugentr@mail.ru

ГАТЕЛЮК Олег Владимирович — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика»; oleg.gatelyuk.61@mail.ru

Assessment of factors influencing electroosmotic drying of moistened insulation in locomotive traction electric motors

S. V. Zhivushko, E. A. Tretiakov, O. V. Gatelyuk

Omsk State Transport University, 35 Marksa pr., Omsk, 644046, Russia

For citation: Zhivushko S.V., Tretiakov E.A., Gatelyuk O.V. Assessment of Factors Influencing Electroosmotic Drying of Moistened Insulation in Locomotive Traction Electric Motors // Proceedings of Petersburg State Transport University. 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 17–26. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-17-26. (In Russian)

Abstract

Objective: to assess the factors influencing the electroosmotic drying rate of moistened insulation of windings in a traction DC motor. **Methods:** experimental study with processing of results using mathematical statistics methods. **Results:** two series of experiments on electroosmotic drying of moistened insulation in a traction DC motor were carried out at different applied voltages and C-filter capacitances. A sample comprising 60 insulation resistance measurements of the TEM main poles, 30 per series, was obtained. Regression analysis was performed, yielding coefficients of determination of 0.996 with respect to voltage and 0.804 with respect to C-filter capacitance. The consistency of the experimental data was confirmed by the Wilcoxon test. A two-factor analysis of variance for related samples was also carried out. The applied voltage and the C-filter capacitance each exerted a significant effect on the electroosmotic drying rate. The individual-difference and the sample-difference factors were determined as insignificant. Increasing the electroosmotic drying voltage from 500 to 2500 V have produced a quadratic rise in the insulation resistance of the main poles amounting to 210%, whereas lowering the ripple coefficient from 0.2 to 0.04 yielded a 45% reduction in insulation resistance. **Practical significance:** the data obtained can be employed to develop an electroosmotic drying technology for TEM in depot service during subzero temperatures periods.

Keywords: rolling stock, traction electric motor, winding, insulation, moisture, drying, electroosmosis, regression analysis, rank method, Wilcoxon test, two-factor analysis of variance, unrelated sample

References

1. Vajda D. Issledovaniya povrezhdenij izolyatsii. M.: Energiya, 1968. 400 s. (In Russian)
2. Sravnitel'naya otsenka razlichnykh sposobov sushki izolyatsii obmotok elektrodvigatelej / A. E. Nemirovskij [i dr.] // Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2022. T. 25, no. 4. S. 354–364. (In Russian)
3. Issledovanie sushchestvuyushchikh metodov sushki uvlazhnennoj izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelej lokomotiva / M. Yu. Khazheeva [i dr.] // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya. 2024. T. 21, no. 2. S. 508–516. (In Russian)
4. Orlova M. A., Dul'tseva E. V. Sovershenstvovanie tekhnologii sushki tyagovykh dvigatelej elektrovozov // Molodezhnaya nauka: trudy XXVI Vserossijskoj studentcheskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii KrIZhT IrGUPS (Krasnoyarsk, 22 aprelya 2022 goda). T. 2. Krasnoyarsk: Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2022. S. 244–249. (In Russian)
5. Nemirovskij A. E., Kichigina G. A., Sergievskaya I. Yu. Elektroosmoticheskaya sushka i vlagozashchita elektrooborudovaniya // Fyodorovskie chteniya — 2017: XLVII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s elementami nauchnoj shkoly (Moskva, 15–17 noyabrya 2017 goda). M.: ID MEI, 2017. S. 166–170. (In Russian)

6. Sposob elektroosmoticheskoy sushki izolyatsii obmotok elektricheskikh mashin: patent No. 2174280 Rossijskaya Federatsiya, MPK N02K 15/12 15/00. No. 2000132540/09 / Moroz N. K., Nemirovskij A. E., Simakov K. P.; zayavl. 26.12.2000; opubl. 27.09.2001. 7 s. (In Russian)

7. Tret'yakov E. A., Balagin O. V., Zhivushko S. V. Povyshenie ekspluatatsionnoj nadezhnosti elektrovozov za schet snizheniya uvlazhnennosti izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelej na osnove elektrokineticheskikh yavlenij // Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta. 2023. T. 82, no. 3. S. 236–245. (In Russian)

8. Rezul'taty ispytanij sushki uvlazhnennoj izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelej elektrovozov na osnove elektrokineticheskikh yavlenij v usloviyakh depo / E. A. Tret'yakov [i dr.] // Transport Urala. 2023. No. 2 (77). S. 92–96. (In Russian)

9. Kobzar' A. I. Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov. M.: Fizmatlit, 2006. 816 s. (In Russian)

10. Sidorenko E. V. Metody matematicheskoy obrabotki v psikhologii. SPb.: Rech', 2004. 350 s. (In Russian)

11. Shchukin, E. D., Pertsov A. V., Amelina E. A. Kolloidnaya khimiya: ucheb. dlya vuzov. 7-e izd., ispr. i dop. M.: Yurajt, 2025. 444 s. (In Russian)

Received: 20.10.2025

Accepted: 18.01.2026

Author's information:

Sergei V. ZHIVUSHKO — Post-graduate student of the Department of “Electric Rolling Stock”; s.zhivushko@yandex.ru

Evgenii A. TRETIAKOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of “Electric Rolling Stock”; eugentr@mail.ru

Oleg V. GATELYUK — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of “Higher Mathematics”; oleg.gatelyuk.61@mail.ru