

---

## ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.423.31

### 3D-модель напряженного состояния изоляции тяговых электродвигателей локомотивов

**М. А. Шрайбер, В. В. Грачев, А. В. Грищенко**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Шрайбер М. А., Грачев В. В., Грищенко А. В. 3D-модель напряженного состояния изоляции тяговых электродвигателей локомотивов // Бюллетень результатов научных исследований. 2026. Вып. 1. С. 7–16. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-7-16

#### Аннотация

**Цель:** оценить уровень термомеханических напряжений в изоляционном материале тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов. **Методы:** анализ термомеханических напряжений проводился с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе SolidWorks 2010 для детального изучения напряженно-деформированного состояния изоляционного материала на всех этапах нагружения, обеспечивая высокую точность и надежность результатов. **Результаты:** термомеханические напряжения оказывают значительное влияние на динамическое термическое старение изоляционной системы обмоток. Они вызывают усталостные разрушения, которые приводят к деградации изоляционных свойств и снижению надежности ТЭД. На основе полученных данных разработана методика численного моделирования, позволяющая точно предсказывать напряженно-деформированное состояние изоляционного материала на различных этапах нагружения. Это обеспечивает возможность проектирования и оптимизации конструкций ТЭД с учетом реальных эксплуатационных условий. Разработанная методика может быть применена для оценки термомеханических напряжений в пропиточных материалах изоляции ТЭД и аналогичных конструкциях, что расширяет ее практическое применение и значимость. Это представляет собой важный шаг в понимании механизмов старения изоляции ТЭД и разработке методов повышения их надежности и долговечности. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы для создания новых технологий и инженерных решений, которые значительно улучшат эксплуатационные характеристики локомотивов, снижая затраты на их обслуживание и повышая безопасность перевозок.

**Ключевые слова:** тяговый электродвигатель локомотива, тепловые процессы электрических машин, старение изоляции, термомеханические напряжения, надежность электрических машин

#### Введение

В процессе эксплуатации изоляция ТЭД подвергается динамическим нагрузкам, вызванным колебаниями тока, изменяющимися от минимальных до максимальных значений. Эти изменения вызывают температурный градиент между медным проводником и стальным сердечником, что приводит к термоциклированию

обмоток [1]. Термомеханическая усталость, обусловленная циклическими изменениями температуры, является дополнительным механизмом повреждения изоляции обмоток [2]. Это существенно снижает надежность ТЭД, а также увеличивает затраты на техническое обслуживание и ремонт.

Изоляционный материал обмоток ТЭД представляет собой сложную композицию разнородных компонентов, обладающих уникальными физико-механическими свойствами. Неоднородность структуры изоляции и ее свойств создает значительные трудности для анализа напряженно-деформированного состояния изоляции [3].

С развитием современных ТЭД, характеризующихся высокой удельной мощностью и улучшенными эксплуатационными свойствами, возрастает необходимость исследования термомеханических напряжений в материале изоляции, возникающих вследствие теплового расширения. Это критически важно для создания эффективных изоляционных систем, обеспечивающих надежную и долговечную работу перспективных ТЭД.

Исследования показывают прямую зависимость между температурными напряжениями и продолжительностью службы материалов [4, 5]. Для ТЭД предельно допустимые температуры нагрева обмоток строго регламентируются на основе длительных эксплуатационных испытаний. В течение суток температура обмоток ТЭД может изменяться в зависимости от температуры окружающей среды до 120–160 °С [6].

Обычно, когда мы исследуем внутренние напряжения в однородных материалах, мы хотим узнать, сможет ли объект выдержать определенную нагрузку. Если напряжение превышает предел прочности материала на растяжение, происходит разрушение. Однако в случае с изоляцией ТЭД это не совсем так. Если в изоляции появляется термомеханическое повреждение, это еще не значит, что ТЭД неисправен. К отказу ТЭД приводят другие факторы, связанные с повреждением изоляции. Эти факторы могут быть вызваны попаданием в поврежденное место атмосферной влаги, продуктов износа ТЭД и подвижного состава, а также дорожной пыли [7].

Подбор изоляционных материалов должен учитывать не только их электрические, но и термические, а также механические характеристики. Только так можно обеспечить надежную работу ТЭД в условиях, где каждый сбой может привести к серьезным последствиям. Это критически важно для обеспечения безопасности и эффективности железнодорожного транспорта, где надежность и долговечность оборудования играют ключевую роль [8, 9].

### **Математическая модель**

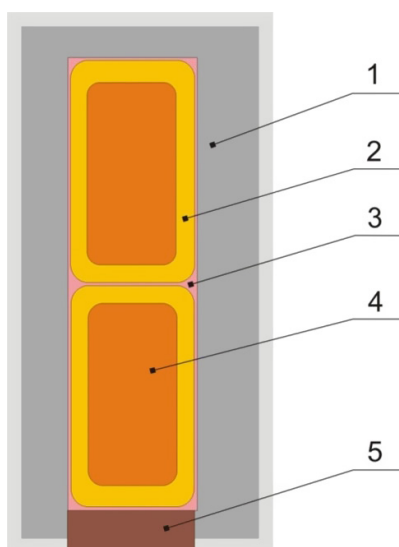
Все материалы, которые используются для изоляции в современных электрических машинах промышленного назначения, в той или иной степени проявляют свойства, характерные для вязкоупругих материалов. Вязкоупругий материал

сочетает в себе как упругие, так и вязкие характеристики. Его деформация зависит от температуры [10].

В настоящей работе были использованы численные данные по свойствам изоляционных материалов, которые приведены в [11]. Эти данные позволили оценить не только свойства материала изоляции, но и его сопротивление сдвигу и поперечному отрыву. Оказалось, что большинство волокнистых материалов обладают существенной анизотропией упругих и прочностных свойств и наряду с рекордными свойствами при растяжении вдоль волокон плохо сопротивляются межслойному сдвигу и поперечному отрыву.

Если температура распределяется равномерно по всей длине объекта, то он будет подвергаться равномерной тепловой деформации во всех направлениях.

Геометрия обмотки, использованная в исследовании термомеханических процессов в данном случае: принята двухпроводная обмотка, проводники которой имеют прямоугольное поперечное сечение, изоляция представлена монолитным материалом, как показано на рис. 1.



**Рис. 1.** Расчетная схема паза:

1 — клин, 2 — изоляция, 3 — проводник, 4 — пропиточный материал, 5 — сердечник

Для описания поведения реального материала изоляции можно использовать обобщенную модель [12]. Через любую точку упругого тела, подверженного действию внешней нагрузки, можно провести бесчисленное множество сечений (площадок), по которым в общем случае будут действовать как нормальные, так и касательные напряжения. При этом величина и направление указанных напряжений в каждом конкретном случае будут зависеть от ориентации площадки. Одним из результатов, ожидаемых от моделирования, является определение доминирующих напряжений, нормальных или касательных. В случае простой однонаправленно нагруженной площадки внешняя нагрузка прикладывается по осям  $x$ ,  $y$  или  $z$  (рис. 2).

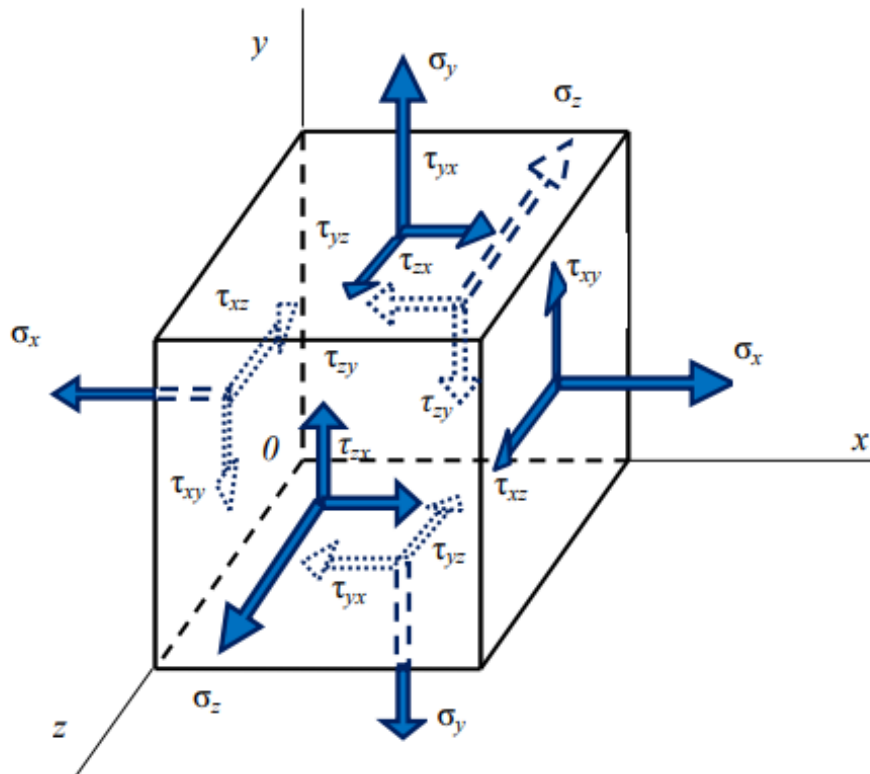


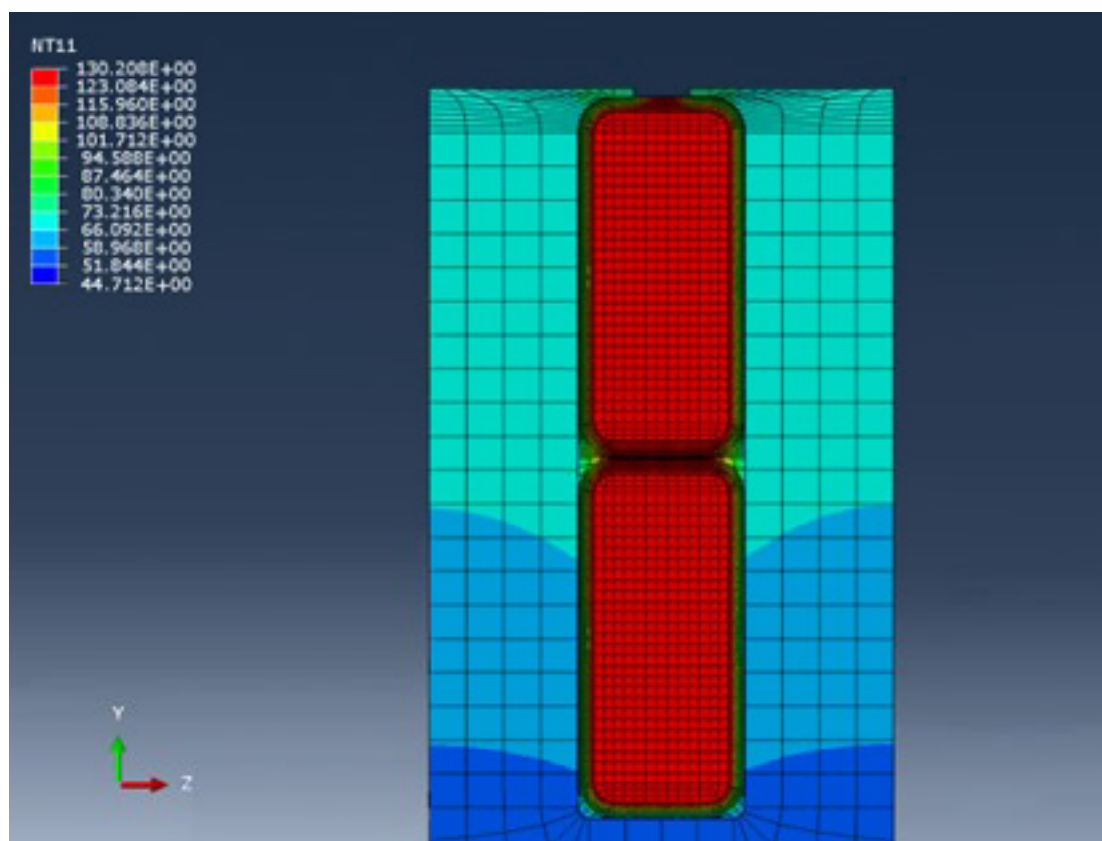
Рис. 2. Пространственное напряженное состояние материала изоляции

В общем случае имеется шесть компонентов напряжения, три из которых представляют нормальные напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  в направлении осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , а три других — касательные напряжения  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$ . Касательные напряжения — это напряжения, параллельные поперечному сечению образца.

К каждой поверхности приложено одно нормальное и два касательных напряжения сдвига, а нижние индексы обозначают направление, на которое указывает напряжение, и поверхность, параллельно которой приложено касательное напряжение. Например, возьмем  $X$ -поверхность. На ней изображено три напряжения: одно нормальное напряжение в  $x$ -направлении и  $\sigma_x$ , параллельно этому поперечному сечению действуют два касательных напряжения  $\tau_{xy}$  и  $\tau_{xz}$ . Первый индекс обозначает поверхность, которой они параллельны, а второй — направление, на которое они указывают. Так, например,  $\tau_{xy}$  — это касательное напряжение, параллельное поверхности  $x$  и направленное в сторону  $y$ . Для того чтобы трехмерный куб находился в равновесном состоянии, необходимо обязательное выполнение следующего условия:  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ , в противном случае он будет вращаться [12].

В настоящей работе термомеханические напряжения в изоляции обмоток ТЭД исследованы численно с использованием программного обеспечения SolidWorks 2010. В качестве тестового примера в исследовании используется коллекторный ТЭД типа ЭД-118А [13].

На рис. 3 приведены результаты моделирования нормальных напряжений, возникающих в материалах обмотки статора при изменении температуры медного проводника на  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ . На этом температурном пике нормальные напряжения максимальны, поэтому расчет выполняется для данного значения.



**Рис. 3.** Распределение нормальных напряжений в медном проводнике и материале изоляции

Изображение несколько увеличено, и на нем представлены только наиболее критические области, в которых возникают максимальные нормальные напряжения. Области с максимальными значениями нормальных напряжений выделены красным цветом. Результаты расчета значений напряжений в материале обмотки, представленные на рис. 3, показаны в табл. 1.

**ТАБЛИЦА 1.** Результаты расчета напряжений в материалах обмотки

Материал	$\sigma_z$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа
Медь	59,8	5,7
Изоляция	33,7	2,4
Сердечник	86,4	6,9

Области зубца статора вблизи обмоток испытывают более высокие напряжения из-за разницы в коэффициентах теплового расширения железа и материала изоляции в обмотках. Напряжение больше сконцентрировано в вершине зуба и медном проводнике поблизости из-за деформации, вызванной тепловым расширением.

Из рис. 3 видно, что проводник на внешнем слое испытывает более высокое напряжение по сравнению со средним слоем. Вероятно, это связано с тем, что медный проводник симметрично окружен пропиточным составом. Поэтому расширение, вызванное нагревом, симметрично распределяется вокруг проводников в средних слоях. Однако во внутреннем и внешнем слоях расширение несимметрично, поскольку внутренний слой изоляции расположен близко к проводнику и подвергается воздействию более высокой температуры, а внешний слой контактирует с материалом сердечника, который имеет несколько меньшую температуру.

### Результаты моделирования

В табл. 2 приведены общие результаты расчета термомеханических напряжений в пазах ТЭД при изменении температуры  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ . Здесь приведены максимальные амплитуды каждого из компонентов напряжений. Перечисленные значения представляют собой напряжения, которые вычисляются во время моделирования при достижении максимального приращения температуры. Максимальные нормальные напряжения приходятся на сердечник статора из-за острых углов и высокого модуля упругости. Преобладающими напряжениями, воздействующими на изоляцию проводника, являются касательные напряжения сдвига.

ТАБЛИЦА 2. Максимальные значения напряжений в элементах обмотки ТЭД

	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_z$ , МПа	$\tau_{xy}$ , МПа	$\tau_{xz}$ , МПа	$\tau_{yz}$ , МПа
Проводник	39,8	5,7	59,8	6,2	13,9	11,5
Изоляция проводника	17,2	2,4	33,7	4,8	5,7	3,7
Корпусная изоляция	18,5	3,8	37,1	3,6	3,9	2,7
Сердечник статора	82,3	6,9	86,4	5,6	6,1	4,0
Пропитка	18,8	3,4	35,7	3,4	3,5	2,9

Распределение термических напряжений в изоляции крайне неоднородно как в верхней, так и в нижней части паза. Это происходит из-за взаимного влияния проводников, что создает сложные условия для распределения тепла. Максимальные значения термических напряжений представляют наибольший практический

интерес, поскольку их превышение может привести к серьезным повреждениям изоляции. Такие повреждения могут значительно снизить эффективность работы ТЭД и даже вызвать аварийные ситуации.

## Выводы

1. Представлена простая модель для оценки межфазных термических напряжений в материале изоляции. В частности, обнаружено, что межфазные касательные и нормальные напряжения, предсказанные настоящей моделью, достаточно хорошо согласуются с известными численными решениями.

2. Проведено численное моделирование материала изоляции с целью изучения и минимизации термических напряжений с использованием вязкоупругой модели. Проведенный анализ позволил лучше понять поведение напряжений в зависимости от изменений температуры обмотки.

3. Различие коэффициентов теплового расширения составляющих обмотки вызывает напряжения сдвига, сжатия и растяжения в материале изоляции ТЭД локомотивов. В подавляющем большинстве случаев перечисленные напряжения имеют циклический знакопеременный характер. Наиболее опасными являются напряжения сдвига, которые ослабляют связь между слоями материала изоляции и могут привести к появлению трещин и расслоений.

## Список источников

1. Попов А. А., Логинова Е. Ю. Результаты экспериментального и расчетного определения температур обмоток тягового электродвигателя электровоза // Вестник ВНИИЖТ. 1999. № 6. С. 34–39.

2. Влияние климатического старения на характеристики упругости и прочности полимерных композитных материалов / В. Ф. Кутьинов [и др.] // Ученые записки ЦАГИ. 2006. № 4. С. 54–64.

3. Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений / В. В. Сушков [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 10. С. 74–80

4. Исмаилов Ш. К. Электрическая прочность изоляции электрических машин локомотивов: монография. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2003. 272 с.

5. Odegard G., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymers and their composites // Polymer Physics, 2011, vol. 49, iss. 24, pp. 1695–1716.

6. Экспериментальные исследования теплового состояния коллектора ТЭД / А. В. Грищенко [и др.] // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век: сборник материалов VI Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора кафедры «Электрическая тяга» ПГУПС А. В. Плакса. СПб., 2018. С. 124–129.

7. Грачев В. В., Грищенко А. В., Шрайбер М. А. Методика оценки степени увлажнения изоляции тяговых электродвигателей тепловозов // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 4. С. 47–56.
8. Устройство и ремонт электровозов и электропоездов: учебник / А. В. Грищенко [и др.]; под ред. А. В. Грищенко. М.: Академия, 2010. 320 с.
9. Корицкий Ю. В., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Справочник по электротехническим материалам. Т. 1. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1986. 368 с.
10. Пак В. М., Трубачев С. Г. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 2007. 416 с.
11. Алиев И. И., Калганова С. Г. Электротехнические материалы и изделия. М.: РадиоСофт, 2005. 329 с.
12. Тимошенко С. П. Механика материалов: учебник для вузов. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2002. 672 с.
13. Грищенко А. В., Козаченко Е. В. Новые электрические машины локомотивов: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. 271 с.

Дата поступления: 06.11.2025

Решение о публикации: 09.02.2026

#### **Контактная информация:**

ШРАЙБЕР Марина Александровна — канд. техн. наук, доцент; goshapti4ka@yandex.ru

ГРАЧЕВ Владимир Васильевич — д-р техн. наук, профессор; lt@pgups.ru

ГРИЩЕНКО Александр Васильевич — д-р техн. наук, профессор; lt@pgups.ru

## **3D model of the stress-strain state of the locomotive traction electric motor insulation**

**M. A. Shrayber, V. V. Grachev, A. V. Grischenko**

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** *Shrayber M.A., Grachev V.V., Grishchenko A.V.* 3D model of the stress-strain state of the locomotive traction electric motor insulation // Bulletin of scientific research results, 2026, iss. 1, pp. 7–16. DOI: 10.20295/2223-9987-2026-1-7-16. (In Russian)

#### **Abstract**

**Objective:** to quantify thermomechanical stresses in the insulation of locomotive traction electric motors (TED). **Methods:** thermomechanical stress analysis was performed using the finite element method (FEM) within the SolidWorks 2010 environment, enabling a detailed evaluation of the insulation material's stress-



strain state across all loading stages while ensuring high accuracy and reliability. **Results:** thermomechanical stresses significantly accelerate dynamic thermal aging of the winding insulation provoking fatigue damage that degrades insulating properties and diminishes TED reliability. From these findings, a numerical modelling technique was developed to accurately predict the insulation material's stress-strain behavior under various loading conditions. This approach enables the design and optimization of TED structures under actual operating conditions. The developed methodology can be applied to assess thermomechanical stresses in treated insulation materials associated with TEDs and analogous structures, thereby broadening its practical applicability and significance. It constitutes an important advance in elucidating the aging mechanisms of TED insulation and in devising measures to enhance their reliability and service life. **Practical importance:** the findings can guide the creation of innovative technologies and engineering solutions that will significantly improve locomotive performance, reduce maintenance costs and increase transportation safety.

**Keywords:** locomotive traction electric motor, thermal processes of electric machines, insulation aging, thermomechanical stresses, and reliability of electric machines

## References

1. Popov A. A., Loginova E. Yu. Rezul'taty eksperimental'nogo i raschetnogo opredeleniya temperatur obmotok tyagovogo elektrodvigatelya elektrovoza // Vestnik VNIIZhT. 1999. No. 6. S. 34–39. (In Russian)
2. Vliyanie klimaticheskogo stareniya na kharakteristiki uprugosti i prochnosti polimernykh kompozitnykh materialov / V. F. Kut'inov [i dr.] // Uchenye zapiski TsAGI. 2006. No. 4. S. 54–64. (In Russian)
3. Otsenka ostatochnogo resursa izolyatsii pogruzhnogo elektrodvigatelya ustanovok elektricheskikh tsentrobezhnykh nasosov dobychi nefi pri vozdeystviyakh impul'snykh perenapryazhenij / V. V. Sushkov [i dr.] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2017. T. 328, no. 10. S. 74–80. (In Russian)
4. Ismailov Sh. K. Elektricheskaya prochnost' izolyatsii elektricheskikh mashin lokomotivov: monografiya. Omsk: Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2003. 272 s. (In Russian)
5. Odegard G., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymers and their composites // Polymer Physics. 2011. Vol. 49, iss. 24. Pp. 1695–1716.
6. Eksperimental'nye issledovaniya teplovogo sostoyaniya kollektora TED / A. V. Grishchenko [i dr.] // Lokomotivy. Elektricheskij transport. XXI vek: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoj 90-letiyu so dnya rozhdeniya doktora tekhnicheskikh nauk, professora kafedry «Elektricheskaya tyaga» PGUPS A. V. Plaksa. SPb., 2018. S. 124–129. (In Russian)
7. Grachev V. V., Grishchenko A. V., Shrajber M. A. Metodika otsenki stepeni uvlazhneniya izolyatsii tyagovykh elektrodvigatelej teplovozov // Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij. 2021. No. 4. S. 47–56. (In Russian)
8. Ustrojstvo i remont elektrovozov i elektropoezdov: uchebnik / A. V. Grishchenko [i dr.]; pod red. A. V. Grishchenko. M.: Akademiya, 2010. 320 s. (In Russian)
9. Koritskij Yu. V., Pasyukov V. V., Tareev B. M. Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam. T. 1. 3-e izd. M.: Energoatomizdat, 1986. 368 s. (In Russian)

10. Pak V.M., Trubachev S.G. *Novye materialy i sistemy izolyatsii vysokovol'tnykh elektricheskikh mashin*. M.: Energoatomizdat, 2007. 416 s. (In Russian)

11. Aliev I.I., Kalganova S.G. *Elektrotekhnicheskie materialy i izdeliya*. M.: RadioSoft, 2005. 329 s. (In Russian)

12. Timoshenko S.P. *Mekhanika materialov: uchebnik dlya vuzov*. 2-e izd., ster. SPb.: Lan', 2002. 672 s. (In Russian)

13. Grishchenko A.V., Kozachenko E.V. *Novye elektricheskie mashiny lokomotivov: uchebnoe posobie dlya vuzov zh.-d. transporta*. M.: GOU "Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte", 2008. 271 s. (In Russian)

Received: 06.11.2025

Accepted: 09.02.2026

**Author's information:**

Marina A. SHRAJBER — PhD in Engineering, Associate Professor; goshapti4ka@yandex.ru

Vladimir V. GRACHEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; lt@pgups.ru

Alexander V. GRISCHENKO — Dr. Sci. in Engineering, Professor; lt@pgups.ru