

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.13

Сергей Александрович Нестеров

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: elmash@em.ispu.ru

Алла Андреевна Миронова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: miral9702@gmail.com

Анализ влияния кольца электропроводящей магнитной жидкости на токи в подшипниках электрических двигателей

Авторское резюме

Состояние вопроса. Эксплуатация электродвигателей в системах с частотным регулированием сопряжена с проблемой преждевременного выхода из строя подшипников качения из-за текущих через них паразитных токов. Одним из способов решения данной проблемы является шунтирование подшипника специальной щеткой, электрически соединяющей подшипниковый щит с валом электродвигателя. Однако данный способ имеет ряд существенных недостатков: нестабильное переходное сопротивление; искрение; необходимость обслуживания; ограниченную применимость во взрывоопасных средах. В связи с этим разработка метода шунтирования подшипниковых токов, лишенного указанных недостатков, является актуальной научной задачей.

Материалы и методы. Для создания электрического контакта между валом и корпусом электродвигателя использована электропроводящая магнитная жидкость, полученная путем добавления в нанодисперсную магнитную жидкость частиц графита или графена. Влияние электропроводящего магнитожидкостного кольца на подшипниковый ток исследовано с помощью схемы замещения для синфазного тока, разработанной в MatLab Simulink.

Результаты. Предложен метод создания стабильного электрического контакта между корпусом и валом электродвигателя с помощью электропроводящей магнитной жидкости. Влияние электропроводящего магнитожидкостного кольца на подшипниковый ток осуществлено с использованием созданной в MatLab Simulink электрической схемы замещения для синфазного тока, работающего от преобразователя частоты электродвигателя с учетом паразитных емкостей между его узлами. Установлено, что при введении в схему активного сопротивления $R_{\text{мж}} = 2,1$ Ом, моделирующего кольцо электропроводящей магнитной жидкости, включенного параллельно емкости подшипника, ток через подшипник снизился в 23 раза, с 9,33 до 0,4 мА.

Выводы. Полученные данные подтверждают эффективность применения магнитожидкостного уплотнения с электропроводящей магнитной жидкостью в качестве шунтирующего элемента для снижения паразитных токов в подшипниках. Магнитожидкостное уплотнение с электропроводящей магнитной жидкостью является перспективной альтернативой щеточным системам заземления вала. Предложенный метод обеспечивает стабильный электрический контакт без сухого механического трения и искрения, что повышает надежность и расширяет область применения электродвигателей, включая взрывоопасные среды.

Ключевые слова: подшипниковые токи, электропроводящая магнитная жидкость, электрический двигатель, магнитожидкостное уплотнение

Sergei Aleksandrovich Nesterov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Head of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: elmash@em.ispu.ru

Alla Andreevna Mironova

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: miral9702@gmail.com

Analysis of the influence of an electrically conductive ferrofluid ring on bearing currents in electric motors

Abstract

Background. The operation of electric motors in variable-frequency drive systems is associated with the problem of premature failure of rolling bearings due to parasitic currents flowing through them. One way to address this issue is to bypass the bearing using a special brush that electrically connects the bearing shield to the motor shaft. However, this method has several significant drawbacks: unstable transition resistance, arcing, the need for maintenance, limited applicability in explosive environments. In this regard, developing a method for shunting bearing currents that is free from the aforementioned drawbacks is an important scientific task.

Materials and methods. To create an electrical contact between the shaft and the housing of the electric motor, an electrically conductive ferrofluid has been used. This fluid is obtained by adding graphite or graphene particles to a nanodispersed ferrofluid. The influence of such a conductive ferrofluid ring on bearing current has been studied using an equivalent electrical circuit for common-mode current developed in MatLab.

Results. A method has been proposed to create a stable electrical contact between the housing and the shaft of an electric motor using an electrically conductive ferrofluid. The influence of the electrically conductive ferrofluidic ring on bearing current has been studied using an equivalent electrical circuit for the common-mode current of a frequency-converter-driven electric motor, developed in MatLab Simulink and taking into account the stray capacitances between its components. It has been found that when an active resistance of $R_{my} = 2,1 \Omega$ (simulating a conductive magnetic fluid ring) has been introduced into the circuit and connected in parallel with the bearing capacitance, the current through the bearing has decreased by 23 times from 9,33 to 0,4 mA.

Conclusions. The obtained data confirm the effectiveness of a ferrofluid seal with an electrically conductive ferrofluid as a bypass element to reduce parasitic currents in bearings. A ferrofluid seal with an electrically conductive ferrofluid is a promising alternative to brush-based shaft grounding systems. The proposed method provides a stable electrical contact without dry mechanical friction or arcing, which enhances reliability and expands the range of applications for electric motors, including use in explosive environments.

Key words: bearing currents, electrically conductive ferrofluid, electric motor, ferrofluid seal

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.4.058-063

Введение. Одной из актуальных проблем эксплуатации электродвигателей, особенно в системах с частотным регулированием, является преждевременный выход из строя подшипников качения. Значительная доля отказов обусловлена прохождением через подшипники так называемых паразитных токов. Эти токи приводят к электрической эрозии поверхностей качения и тел качения, деградации смазочного материала и заклиниванию подшипника [1–3].

Возникновение паразитных подшипниковых токов обусловлено рядом причин:

- остаточной намагниченностью элементов магнитной цепи электродвигателя;
- синфазным напряжением (сумма трех фаз не равна нулю) на выходе инвертора в современных электроприводах с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ);
- высокой скоростью изменения напряжения при питании от ШИМ, приводящей к появлению емкостных токов через подшипник при пробое смазочной пленки, работающей как диэлектрик.

Одним из традиционных методов борьбы с подшипниковым током является шунтирование

подшипника путем создания контролируемого пути отвода потенциала через корпус на землю. Наиболее распространенным устройством для заземления вала является специальный щеточный узел, соединяющий вал электродвигателя с корпусом. Однако, как показано в [4], щеточный контакт обладает рядом недостатков: нестабильностью переходного сопротивления; искрением в процессе работы; необходимостью в обслуживании; ограниченной применимостью во взрывоопасных средах.

В качестве перспективной альтернативы щеточному контакту рассматривается использование магнитожидкостного уплотнения (МЖУ) с электропроводящей магнитной жидкостью (МЖ), полученной добавлением в нанодисперсную магнитную жидкость на основе магнетита до 0,5 % по массе частиц графена или графита, стабилизированных олеиновой кислотой [5–7]. Конструкция МЖУ содержит несколько зубцов, удерживающих под собой электропроводящую МЖ магнитным полем, и обеспечивает надежный и стабильный электрический контакт вращающегося вала с корпусом, что предотвращает

накопление заряда в подшипнике и электрический пробой его смазочного слоя.

Основным преимуществом такого решения является отсутствие механического сухого трения и искрения щеточного контакта, что гарантирует стабильность контакта и позволяет использовать электродвигатели с таким током в взрывоопасных средах.

Материалы и методы. На рис. 1 в разрезе электродвигателя показаны пути протекания паразитных подшипниковых токов для разных механизмов генерации [1, 4, 8]:

- тока подшипника, генерируемого вследствие высокоскоростных переключений силовых ключей инвертора (линия 1);
- тока электроэрозионной обработки, представляющего собой ток короткого замыкания, протекающего через подшипник при накоплении заряда и пробое масляной пленки (линия 2);
- высокочастотного циркулирующего подшипникового тока, индуцированного неуравновешенным потенциалом между подшипниками приводного и не приводного концов вала (линия 3);
- тока заземления вала через приводной механизм (линия 4).

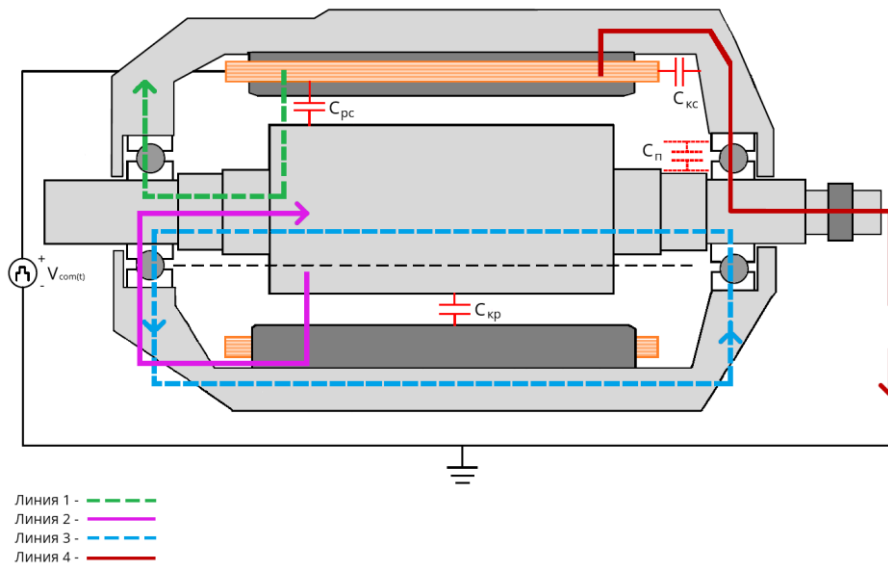


Рис. 1. Пути протекания паразитных токов в электродвигателе

Исследование влияния магнитоэрозионного уплотнения с электропроводящей МЖ на токи, генерируемые в системе «преобразователь частоты – двигатель», проведено на разработанной в MatLab Simulink электрической схеме замещения, показанной на рис. 2 и учитывающей паразитные емкости между узлами электродвигателя (см. рис. 1) и активное сопротивление кольца электропроводящей МЖ.

Источником возбуждения является синфазное напряжение V_{com} (common – mode voltage),

возникающее на выходе инвертора. Пути протекания токов определяются следующими основными емкостями:

- емкостью между обмоткой статора и корпусом двигателя $C_{кк}$;
- емкостью между обмоткой статора и ротором $C_{рс}$;
- емкостью между ротором и корпусом $C_{кр}$;
- емкостью подшипника, образованной масляной пленкой $C_{п}$.

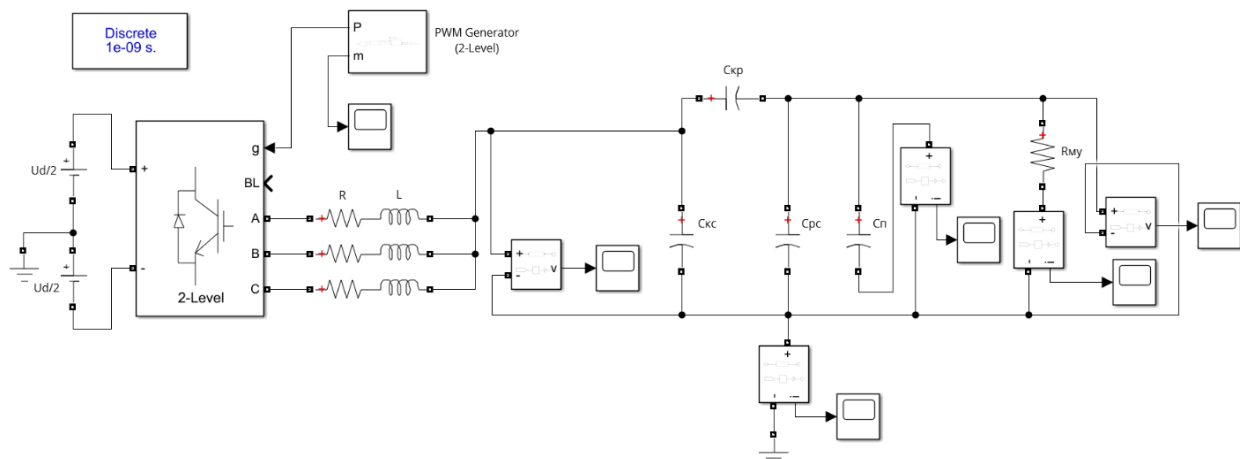


Рис. 2. Схема замещения асинхронного двигателя для расчета тока через подшипник

Использованные при создании модели значения паразитных емкостей представлены в табл. 1 [8].

Таблица 1. **Высокочастотные паразитные емкости электродвигателя**

Паразитная емкость	Значение
Емкость между обмотками статора и корпусом двигателя $C_{кс}$	3600 пФ
Емкость между обмоткой статора и ротором $C_{рс}$	64 пФ
Емкость между ротором и корпусом двигателя $C_{рф}$	1200 пФ
Емкость подшипника, образованная масляной пленкой, $C_{п}$	210–470 пФ

В [4] исследовано переходное сопротивление щеточного контакта при использовании заземляющих щеток: для шести образцов угольных щеток значение переходного сопротивления находится в диапазоне от 0,2 до 0,45 Ом; для образцов щеток из токопроводящего микроволокна переходное сопротивление существенно больше; для двух исследованных образцов составляет 72,1 и 75,6 Ом.

В [9] приведены результаты исследования электрофизических характеристик пластичных смазочных материалов с графитовым наполнителем. Так, по результатам исследования, удельная электрическая проводимость системы с добавлением 0,5 % по массе нанотрубографита равна 0,36 См/м.

Влияние электропроводящей МЖ, используемой в качестве шунтирующего элемента, учтено дополнительным активным сопротивлением $R_{му}$, включенным параллельно эквивалентной емкости подшипника $C_{п}$ и характеризующим электрическое сопротивление магнитоэластичного уплотнения. Тем самым токи, наведенные синфазным напряжением, получают дополнительный путь стока с вала на корпус через электропроводящие магнитоэластичные кольца МЖУ. Чем ниже сопротивление $R_{му}$, тем большая часть тока шунтируется, минуя подшипник.

Параметры, использованные для оценочного расчета электрического сопротивления магнитоэластичного уплотнения при применении в качестве рабочего тела электропроводящей МЖ, представлены в табл. 2.

Таблица 2. **Параметры МЖУ**

Параметр	Обозначение	Значение
Диаметр вала	D	0,028 м
Зазор МЖУ	δ	0,0002 м
Ширина вершины зубца МЖУ	b	0,0005 м
Количество зубцов	n	6
Удельная электрическая проводимость МЖ [2]	σ	0,36 См/м

Для предварительной оценки при расчете электрического сопротивления принято допущение о том, что в создании электрического контакта между подшипниковым щитом и вращающимся валом задействована только область магнитоэластичной пробки, находящаяся непосредственно под вершиной зубца МЖУ. Отказ от учета реальной формы магнитоэластичной пробки сильно упрощает аналитический расчет, но завышает величину активного сопротивления магнитоэластичного кольца. С учетом этого допущения в качестве формулы для расчета величины электрического сопротивления МЖУ получим

$$R = \frac{\delta}{\pi D n b \sigma} = \frac{0,0002}{\pi \cdot 0,028 \cdot 6 \cdot 0,0005 \cdot 0,36} = 2,1 \text{ Ом.}$$

Полученное значение 2,1 Ом сопоставимо с величиной переходного сопротивления щеточного контакта угольных щеток и значительно меньше сопротивления щеток из токопроводящего микроволокна.

Результаты. На рис. 3–6 представлены результаты расчета паразитных токов в MatLab Simulink для схемы замещения без активного сопротивления электропроводящего магнитоэластичного кольца.

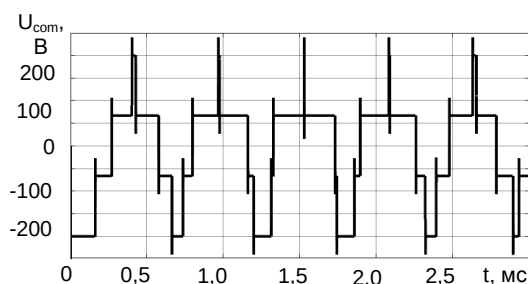


Рис. 3. Синфазное напряжение

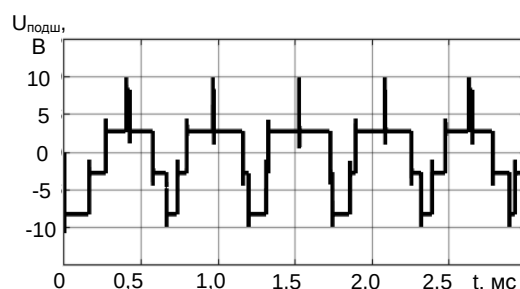


Рис. 4. Напряжение на подшипнике

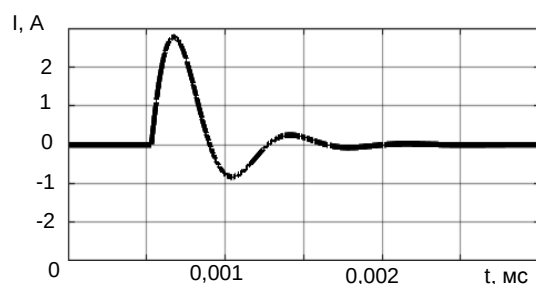


Рис. 5. Ток заземления

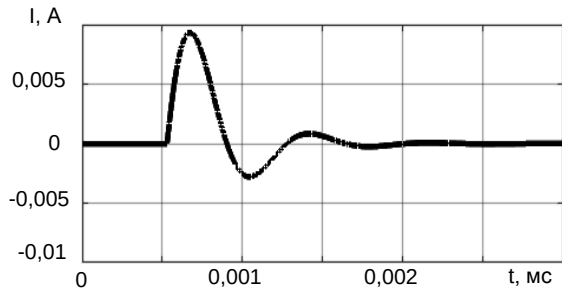


Рис. 6. Ток через подшипник

На рис. 7–10 показаны результаты расчета паразитных токов для схемы, включающей активное сопротивление $R_{\text{мж}}$, моделирующее кольцо электропроводящей МЖ.

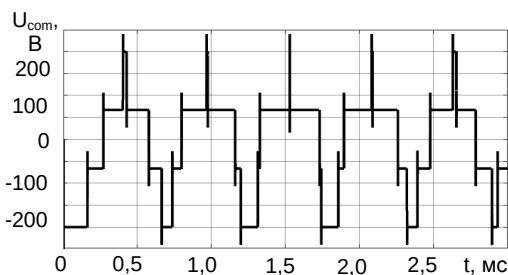


Рис. 7. Синфазное напряжение

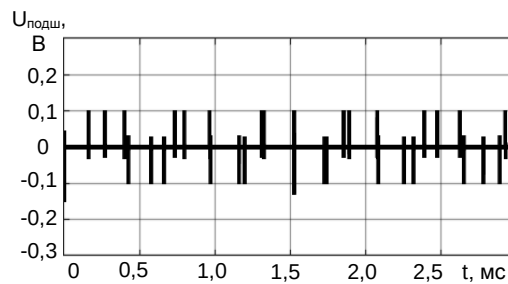


Рис. 8. Напряжение на подшипнике

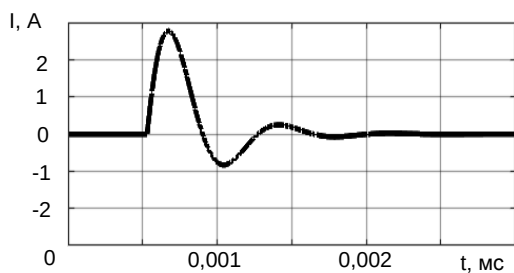


Рис. 9. Ток заземления

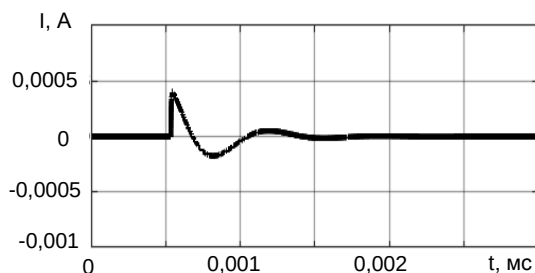


Рис. 10. Ток через подшипник

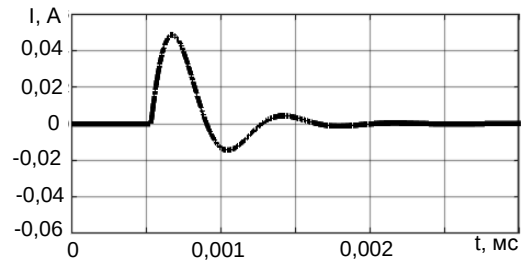


Рис. 11. Ток через магнитоэлектрическое кольцо

Анализ результатов расчета схемы замещения без учета активного сопротивления электропроводящего магнитоэлектрического кольца показывает, что синфазное напряжение $U_{\text{сф}}$ (рис. 3) имеет амплитуду около 250 В и частоту следования импульсов 5 кГц, что соответствует типовым параметрам ШИМ-инвертора. Напряжение на подшипнике (рис. 4) повторяет форму синфазного напряжения, при этом амплитуда высокочастотной составляющей составляет 9,8 В. Ток заземления (рис. 5) имеет импульсный характер и достигает пиковых значений 2,77 А. Ток через подшипник (рис. 6) имеет амплитуду около 9,33 мА, что свидетельствует о наличии энерговыделения в подшипниковом узле, что может приводить к электрической эрозии. При введении в схему активного сопротивления $R_{\text{мж}}$ (расчетное значение для МЖУ проводимостью 0,36 См/м – 2,1 Ом) параллельно емкости подшипника картина существенно меняется. При сохраняющемся неизменным синфазном напряжении (рис. 7) напряжение на подшипнике (рис. 8) теряет выраженную высокочастотную составляющую и его действующее значение устанавливается на уровне 4 мВ. Ток заземления (рис. 9) сохраняется как по форме, так и по величине, так как зависит от величины синфазного напряжения. Ток через подшипник (рис. 10) снижается в 23 раза (до 0,4 мА) по сравнению с нешунтированным состоянием. Для удобства анализа результаты моделирования сведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры подшипникового узла без МЖ и с МЖ

Параметр	Без МЖ	С МЖ	Результат
Пиковый ток заземления, А	2,77	2,77	0 %
Пиковый ток через подшипник, мА	9,33	0,4	–96 %
Пиковый ток через магнитоэлектрическое кольцо, мА	–	48,5	–
Напряжение на подшипнике max, В	9,8	0,1	подавлено
Напряжение на подшипнике RMS, В	4,47	0,004	подавлено

Полученные результаты подтверждают, что даже при завышенном расчетном сопротивлении магнитоидкостного уплотнения 2,1 Ом достигается существенное снижение тока через подшипник, что значительно повышает срок его службы.

Выводы. Эксплуатация электродвигателей в системах с частотным регулированием сопровождается преждевременным выходом из строя подшипников качения из-за протекающих через них паразитных токов. В связи с этим поиск методов их устранения является актуальной научной задачей.

Использование МЖУ с электропроводящей магнитной жидкостью, полученной добавлением в нанодисперсную магнитную жидкость до 0,5 % по массе частиц графена или графита, стабилизированных олеиновой кислотой, является перспективной альтернативой щеточному контакту, используемому для шунтирования подшипникового тока.

Результаты моделирования в MatLab Simulink подтвердили эффективность данного решения, показав снижение тока через подшипник в 23 раза (с 9,33 до 0,4 мА) и подавление высокочастотной составляющей напряжения на подшипнике.

Развитием полученных результатов может служить расчет сопротивления магнитоидкостного кольца путем численного конечно-элементного моделирования с учетом изменения формы магнитоидкостной пробки МЖУ под действием приложенного давления и центробежной силы, возникающей при вращении вала электродвигателя.

Список литературы

1. **Comprehensive** Review of Bearing Currents in Electrical Machines: Mechanisms, Impacts, and Mitigation Techniques / T. Pei, H. Zhang, W. Hua, F. Zhang // *Energies*. – 2025. – Vol.18, No. 3. – P. 517.
2. **Weicker M., Safdarzadeh O., Binder A.** Influence of static rotor imbalance on the roller bearing damage due to inverter-induced bearing currents // *24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe)*. – 2022. – P. 1–11.
3. **Safdarzadeh O., Binder A., Member S.** Measuring Electric Contact in an Axial Ball Bearing at DC Current Flow // *IEEE Transactions on industry applications*. – 2025. – No. 59(3). – P. 3341–3352.
4. **Tranquilini F., Krusemark B., Zawadzki M.** The Different Types of Shaft Bonding Devices and Their Effectiveness // *IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC)*. – Vancouver, BC, Canada, 2019. – P. 443–454.
5. **Pat. US 4604229A.** Electrically conductive ferrofluid compositions and method of preparing and using same / K. Raj, L. Borduz, H.L. Gowda. 1985.
6. **Особенности электропроводности и теплопроводности магнитного нанокolloида с мелкодисперсным немагнитным наполнителем** / Ю.И. Диканский, Ж.Г. Вегера, Ю.Л. Смерек, А.В. Аксенов // *Нанотехника*. – 2009. – № 18. – С. 20–24.

7. **Закинян Р.Г., Смерек Ю.Л., Закинян А.Р.** К механизму электропроводности магнитной жидкости с графитовым наполнителем // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. – 2004. – № 3. – С. 52–55.

8. **An Investigation** into the Effect of Bearing Grease Degradation on the High-frequency dv/dt Bearing Current in an Inverter-fed Motor System / J. Zheng, D. Xiang, H. Li, D.C. Quach // *The 6th International Conference on Power and Renewable Energy*. – Shanghai, China, 2021. – P. 543–547.

9. **Исследование** электрофизических характеристик пластичных смазочных материалов / А.И. Смирнова, Л.И. Минеев, И.А. Герасимов и др. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2022. – Т. 88, № 10. – С. 43–47.

References

1. Pei, T., Zhang, H., Hua, W., Zhang, F. Comprehensive Review of Bearing Currents in Electrical Machines: Mechanisms, Impacts, and Mitigation Techniques. *Energies*, 2025, vol. 18, no. 3, p. 517.
2. Weicker, M., Safdarzadeh, O., Binder, A. Influence of static rotor imbalance on the roller bearing damage due to inverter-induced bearing currents. *24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe)*, 2022, pp. 1–11.
3. Safdarzadeh, O., Binder, A., Member, S. Measuring Electric Contact in an Axial Ball Bearing at DC Current Flow. *IEEE Transactions on industry applications*, 2025, no. 59(3), pp. 3341–3352.
4. Tranquilini, F., Krusemark, B., Zawadzki, M. The Different Types of Shaft Bonding Devices and Their Effectiveness. *IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC)*, Vancouver, BC, Canada, 2019, pp. 443–454.
5. Raj, K., Borduz, L., Gowda, H.L. Electrically conductive ferrofluid compositions and method of preparing and using same. US Patent 4604229, 1985.
6. Dikanskiy, Yu.I., Vegera, Zh.G., Smerek, Yu.L., Aksenov, A.V. Osobennosti elektroprovodnosti i teploprovodnosti magnitnogo nanokolloida s melkodispersnym nemagnitnym napolnitelem [Features of electrical conductivity and thermal conductivity of magnetic nanocolloid with finely dispersed non-magnetic filler]. *Nanotekhnika*, 2009, no. 18, pp. 20–24.
7. Zakinyan, R.G., Smerek, Yu.L., Zakinyan, A.R. K mekhanizmu elektroprovodnosti magnitnoy zhidkosti s grafitovym napolnitelem [On the mechanism of electrical conductivity of magnetic fluid with graphite filler]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki*, 2004, no. 3, pp. 52–55.
8. Zheng, J., Xiang, D., Li, H., Quach, D.C. An Investigation into the Effect of Bearing Grease Degradation on the High-frequency dv/dt Bearing Current in an Inverter-fed Motor System. *The 6th International Conference on Power and Renewable Energy, Shanghai, China*, 2021, pp. 543–547.
9. Smirnova, A.I., Mineev, L.I., Gerasimov, I.A., Golubeva, M.A., Shilov, M.A., Usoltseva, N.V. Issledovanie elektrofizicheskikh kharakteristik plastichnykh smazochnykh materialov [Study of electrophysical characteristics of plastic lubricants]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2022, vol. 88, no. 10, pp. 43–47.