

Анализ повреждений подшипников тяговых машин на электроподвижном составе при питании от преобразователей частоты и напряжения

ТУЛУПОВ В.Д., СЛЕПЦОВ М.А., БРИЕДИС А.С.
НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Технико-экономическая эффективность электроподвижного состава (ЭПС) определяется показателями тягового электропривода, главные из них: стоимость изготовления, затраты на ремонт и обслуживание, срок службы, удельный расход энергии и надёжность работы. На современном ЭПС применяется асинхронный электропривод с широтно-импульсным регулированием напряжения и частотным управлением частоты вращения. Как показывает практика эксплуатации электроприводов с полупроводниковыми преобразователями, участились случаи ускоренного износа подшипников тяговых машин. Подшипниковые токи или токи на валу, которые обычно протекают от вала электрической машины через подшипники, известны со времени изобретения электрических машин. Недавние достижения в области силовой электроники резко расширили сферу применения асинхронных двигателей. В частности, инверторы с импульсной модуляцией (ШИМ) и высокими значениями частоты переключения позволяют электроприводу уменьшить акустический шум при более эффективном преобразовании энергии, однако инверторы также связаны с генерацией подшипниковых токов в асинхронных двигателях. В статье анализируются возможные причины возникновения подшипниковых токов. Показаны типичные изменения подшипников в результате прохождения электрического тока: процесс матирования тел качения, образование рифлений на дорожке проката, деградация смазки. Рассматривается влияние эксплуатационных параметров на частоту возникающих пробоев и распределение сил в подшипниковой системе в зависимости от нагрузки. Делается вывод о том, что потенциальную проблему подшипниковых токов необходимо решать конструкторскими, структурными и алгоритмическими способами на различных этапах проектирования и эксплуатации электротехнических комплексов с регулируемым электроприводами.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *электропоезд, тяговый электропривод, преобразователь частоты и напряжения, подшипниковые токи, повреждение подшипников*

Решение транспортных проблем мегаполисов и создание городских агломераций невозможны без скоординированного развития и интеграции пригородного железнодорожного сообщения с городским общественным транспортом. Примером может служить мировой, и в частности московский, опыт по созданию транспортно-пересадочных узлов.

Основной объем пригородных пассажирских перевозок выполняется электропоездами серий ЭР2Т, ЭТ2М, ЭД4М, ЭП2Д. На всех поездах перечисленных серий применена единая система управления тяговыми электродвигателями и преобразователями, электрооборудование состоит из однотипных аппаратов. Большая часть эксплуатируемых вагонов оборудована системой тягового электропривода (ТЭП) с низкими энергетическими показателями, но с запасом по возможному сроку службы, поэтому на современном этапе актуальна проблема их модернизации [1].

Технико-экономическая эффективность электроподвижного состава (ЭПС) определяется показателями ТЭП, главные из которых: стоимость изготовления, затраты на ремонт и обслуживание, срок службы, удельный расход энергии и надёжность работы.

Развитие силовой электроники позволяет усовершенствовать тяговое электрооборудование моторных вагонов, применить тяговые машины (ТМ) переменного тока, микропроцессорные системы управления и диагностики. Перечисленные мероприятия повышают надёжность и ускоряют проведение ремонтных работ и обслуживание ЭПС.

На современном ЭПС применяется электропривод с асинхронными тяговыми машинами с широтно-импульсным регулированием напряжения и частотным управлением частоты вращения. Для электроснабжения и управления приводными элект-

тродвигателями в большинстве случаев используются полупроводниковые преобразователи (ПП). Как правило, они имеют двухзвенную структуру со звеном постоянного напряжения, а также сглаживающий дроссель, конденсатор, тормозной ключ, тормозной резистор, устройство предварительной зарядки конденсатора и др. [2–3].

На рис. 1 приведена типовая структурная схема электропривода с двухзвенным ПП.

На входе двухзвенного ПП устанавливается выпрямитель напряжения (диодный неуправляемый или транзисторный управляемый – активный), который через трансформатор или сетевой дроссель подключается к сети электроснабжения. На выходе двухзвенного ПП устанавливается автономный инвертор напряжения, который подключается к приводной тяговой машине (ТМ) [4]. Автономный инвертор напряжения ПП функционирует в импульсном режиме. Выходное напряжение автономного инвертора имеет форму высокочастотной последовательности импульсов с постоянной амплитудой и изменяющейся скважностью.

С середины 1990-х годов произошел переход от запираемых тиристоров (GTO) к биполярным транзисторам с изолированным затвором (IGBT).

Благодаря инверторам с технологией IGBT при более высоких частотах переключения возможно

переключение с более низкими потерями. Однако именно эти быстрые переключения приводят к нежелательным побочным эффектам. В [5] перечислены значения времени нарастания фронтов, при которых межфазное напряжение на выходе инвертора нарастает до уровня напряжения промежуточного контура.

В то время как преобразователи с технологией GTO выполняют этот скачок за 2–4 мкс, преобразователям с технологией IGBT для этого требуется всего от 50 до 400 нс. Эти крутые профили напряжения вводят дополнительные высокочастотные составляющие.

Изоляция электрических компонентов характеризуется конечными значениями толщины и площади, поэтому может рассматриваться в качестве емкости. Таким образом, для высокочастотных составляющих сигнала эти емкости представляют собой импедансы, через которые паразитный ток может протекать в землю.

Особый эффект при этом проявляет синфазное напряжение, которое «отвечает» за асимметричные паразитные токи.

На рис. 2,а в виде каскадной диаграммы отображен частотный анализ изменения крутизны напряжения и характеристики сигнала синфазного напряжения (рис. 2,б). Данную принципиальную

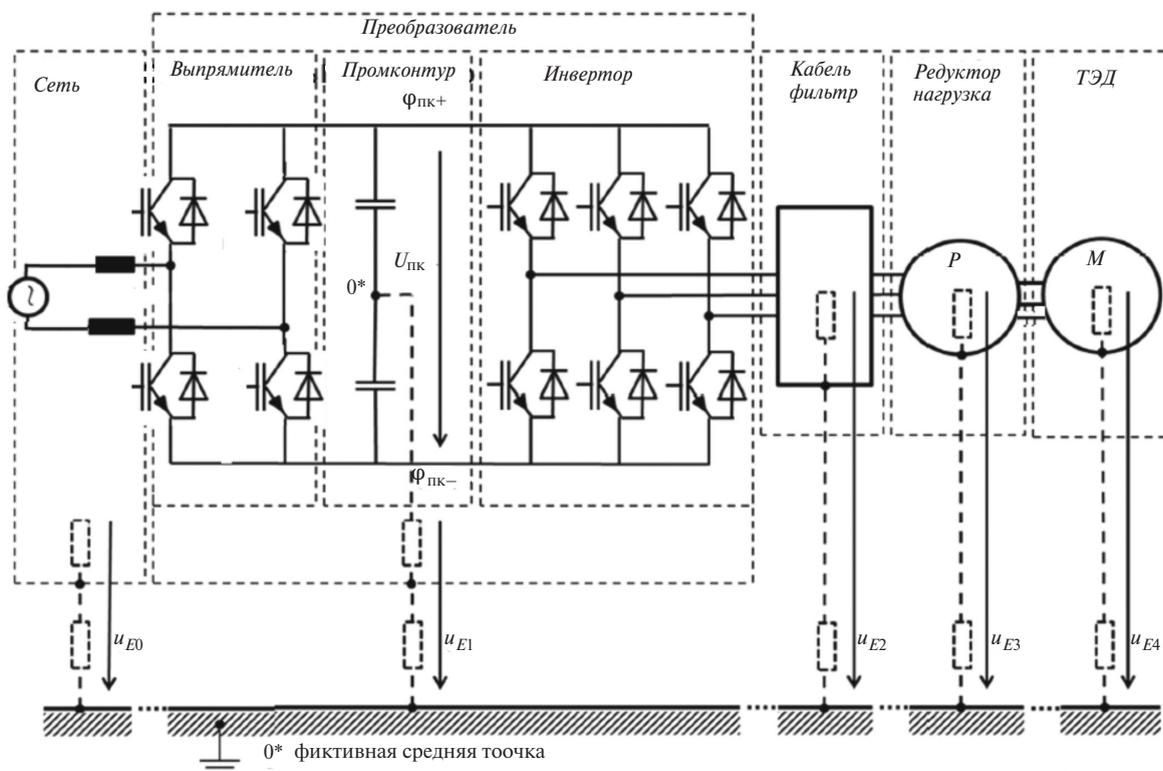


Рис. 1. Принципиальная схема оборудования электропоезда с изображением высокочастотных свойств системы заземления оборудования

Fig. 1. Schematic diagram of the equipment of an electric train depicting the high-frequency properties of the equipment grounding system

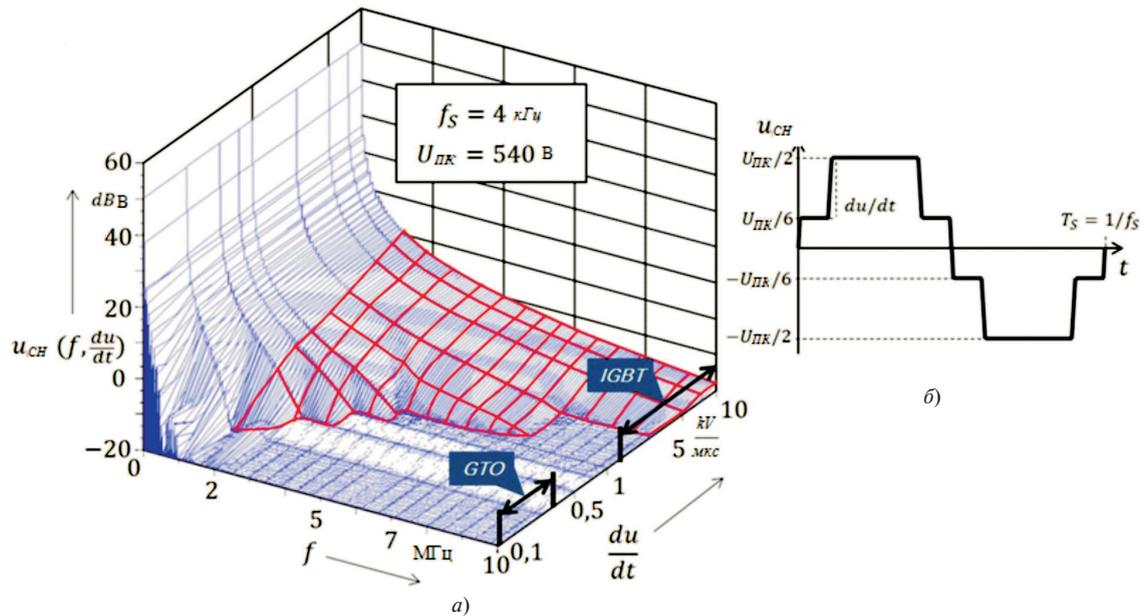


Рис. 2. Частотный анализ изменения крутизны напряжения (а) и синфазное напряжение (б)

Fig. 2. Frequency analysis of voltage slope change (a) and common mode voltage (b)

характеристику сигнала синфазного напряжения можно увидеть при двухточечной технологии построения привода. Характерные уровни напряжения $\pm U_{\text{ПК}}/2$ и $\pm U_{\text{ПК}}/6$ возникают в зависимости от метода модуляции в течение периода переключения T_c в определенные моменты времени.

Следует отметить, что при крутизне напряжения, которая может быть достигнута с биполярными транзисторами с изолированным затвором (от 1 до 10 кВ/мкс, типичная для технологии IGBT), присутствуют дополнительные частотные составляющие в диапазоне от 1 до 10 МГц.

При использовании запираемых тиристоров, время нарастания напряжения на которых составляет от 100 до 300 В/мкс, дополнительные частотные составляющие не возникают.

На графике показан диапазон от 1 до 5 МГц, на котором распознается увеличение амплитуд на 12–20 дБ (В), т.е. в 4–10 раз.

Последствия и эффекты этих помех для системы привода были частично проанализированы в работах [6–8]. Дальнейшие исследования разных авторов позволили разопределить подшипниковые токи по типам [9, 10].

Проблемой электроприводов с ПП остается ускоренный износ подшипниковых узлов приводного электродвигателя [11]. На рис. 3 приведены фотографии, на которых показаны повреждения подшипников качения приводных электродвигателей. Повреждения вызваны образованием в приводном электродвигателе подшипниковых токов, которые могут оказывать непрерывное или краткосрочное воздействие на подшипниковые узлы.

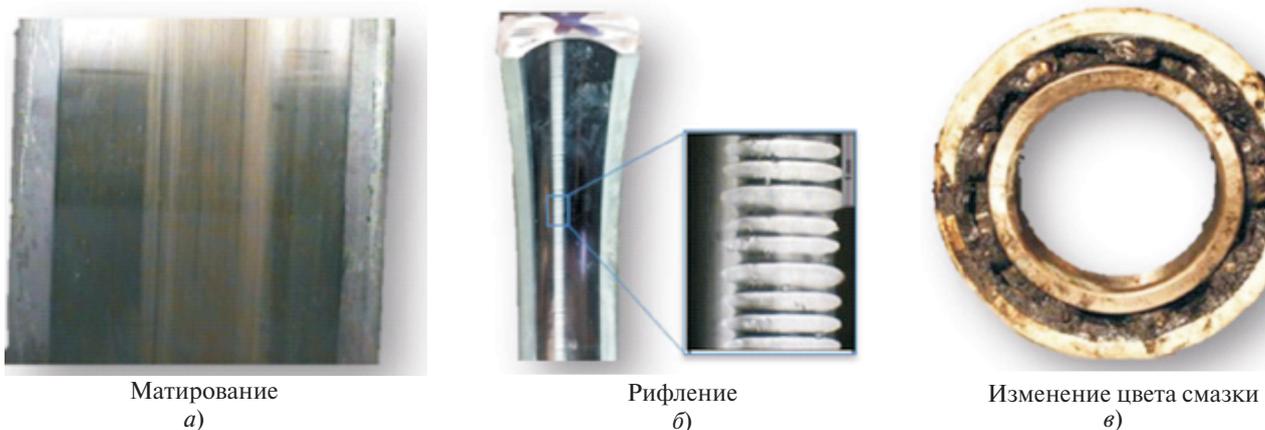


Рис. 3. Типичные изменения подшипников: а – матирование; б – рифление; в – химическое изменение смазки

Fig. 3. Typical bearing changes: a – Matting; b – Reefing; c – Chemical change in lubricant

При протекании токов через подшипниковый узел наблюдаются следующие изменения подшипников: матирование бегунковой дорожки и тел качения; рифление бегунковой дорожки и матирование тел качения; химические изменения смазки.

Матирование бегунковой дорожки и поверхностей тел качения. Материал в случае матирования поверхности бегунковой дорожки и тел качения полностью расплавляется и при вращении подшипников прокатывается [12].

В результате наложения расплавленных кратеров друг на друга и как следствие разного преломления света на них создается впечатление, что поверхность тел качения стала матовой.

Согласно эксплуатационным данным, пока в подшипнике качения достаточно смазки, этот процесс не приводит к снижению его срока службы.

При плотности тока $W > 0,3 \text{ А/мм}^2$ до 100% поверхность бегунковой дорожки переплавляется и становится матовой. На рис. 5 показан процесс развития матирования бегунковой дорожки внешнего кольца подшипника при токе $0,3 \text{ А/мм}^2$ и частоте переключения 2 кГц.

Феномен матирования поверхностей тел качения и бегунковых дорожек подшипника можно обнаружить в каждом тяговом электродвигателе, получающем питание от преобразователя.

Рифление бегунковой дорожки. Значительное сокращение срока службы подшипника идёт не при матировании поверхностей тел качения, а при образовании рифления на бегунковой дорожке.

Предпосылки для перпендикулярной к направлению вращения «горно-долинной», гребёночной структуре следующие: если энергия, высвободившаяся в результате пробоя изоляционного слоя смазки в подшипнике достаточна для испарения материала (рис. 6,а), идёт процесс образования «долины» [13]. Образование пробоев (кратеров) является импульсом для дополнительных колебаний, которые впоследствии как положительная обратная

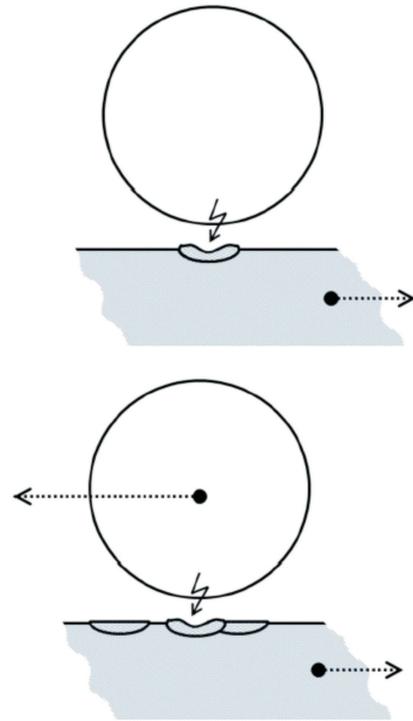


Рис. 4. Схематичное представление образования матированной бегунковой дорожки: а – плавление; б – прокатывание и плавление

Fig. 4. Schematic representation of the bearing ring frosting: a – melting; b – rolling and melting

связь приводят к рифлению бегунковой дорожки подшипника. При визуальном осмотре рифлёной бегунковой дорожки создаётся впечатление, что чередование «гор» и «долин» периодическое.

На рис. 7 представлено многократно увеличенное внешнее кольцо подшипника, подвергнутого рифлению. Можно распознать светлые и тёмные места, которые соответствуют «горам» и «долинам», на возвышенностях можно увидеть структуру матирования поверхности [14].

Изменение в смазке. Консистентная смазка состоит из трёх компонентов: базового масла (70–95%), загустителя (4–30%), присадки (0–5%). Загуститель образует опору для смазочного вещества.

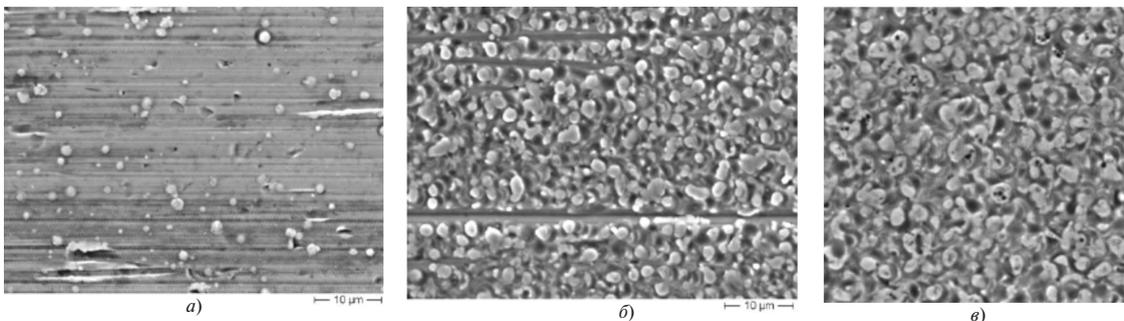


Рис. 5. Развитие матирования на беговой дорожке, направление проката горизонтальное: а – поверхность новой бегунковой дорожки подшипника и неровности; б – почти вся поверхность; в – вся поверхность переплавлена

Fig. 5. Development of matting on the treadmill, the direction of rolling is horizontal: a – the surface of the new bearing runner track and unevenness; b – almost the entire surface; c – the entire surface is remelted

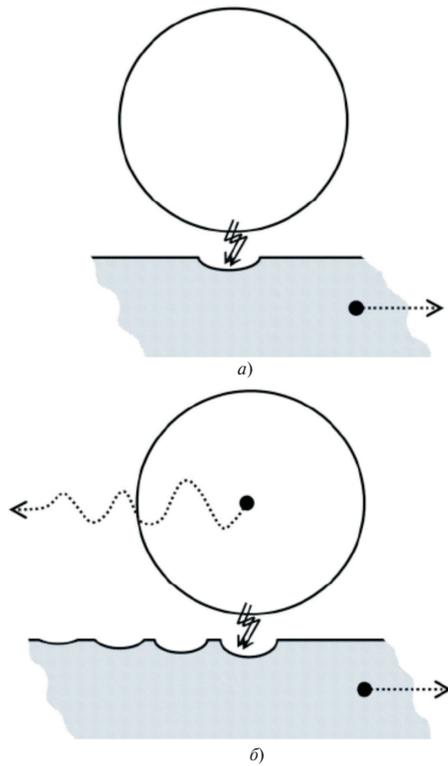


Рис. 6. Описание процесса образования рифлёной бегунковой дорожки подшипника: *a* – испарение материала бегунковой дорожки; *b* – перекатывание и возбуждение вибраций

Fig. 6. Description the bearing reeving process: *a* – material evaporation; *b* – rolling and vibration

В процессе эксплуатации происходит ухудшение, старение и потеря свойств смазки.

Процесс старения зависит: от температуры; катализаторов (частицы металла); концентрации кислорода; условий эксплуатации; сторонних частиц.

Электрическое поле, многочисленные пробой в смазочном зазоре ухудшают свойства смазки, что

повышает локальное трение и увеличивает локальный перегрев. Эти процессы способствуют старению смазки [15].

Энергия дуги отрицательно сказывается на свойствах смазки. Электрические пробой приводят к отвердеванию и потемнению смазки, в результате она теряет свойства. Есть электродвигатели, конструкция которых не подразумевает дополнительную запрессовку смазки, для них данный процесс наиболее опасен [16].

Причины появления подшипниковых токов. Электромагнитный дисбаланс. Одним из основных факторов появления подшипниковых токов является несимметрия электромагнитной системы приводного двигателя, которая может возникнуть по следующим причинам: несимметрии напряжения, подводимого к обмоткам статора; различных значений активного сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора; несимметричного расположения полюсов; неравномерности воздушного зазора между ротором и статором.

Отмеченные факторы электромагнитного дисбаланса являются следствием либо несовершенства конструкции приводного электродвигателя из-за возможного нарушения технологии производства, либо тяжелых условий эксплуатации [17].

Механический дисбаланс. Другая причина появления подшипниковых токов – несовершенство механической части приводного электродвигателя, а именно, подшипниковых узлов.

Вследствие механического дисбаланса ротор приводного электродвигателя начинает совершать эллиптические движения в расточке статора. Это вызывает электромагнитный дисбаланс приводного

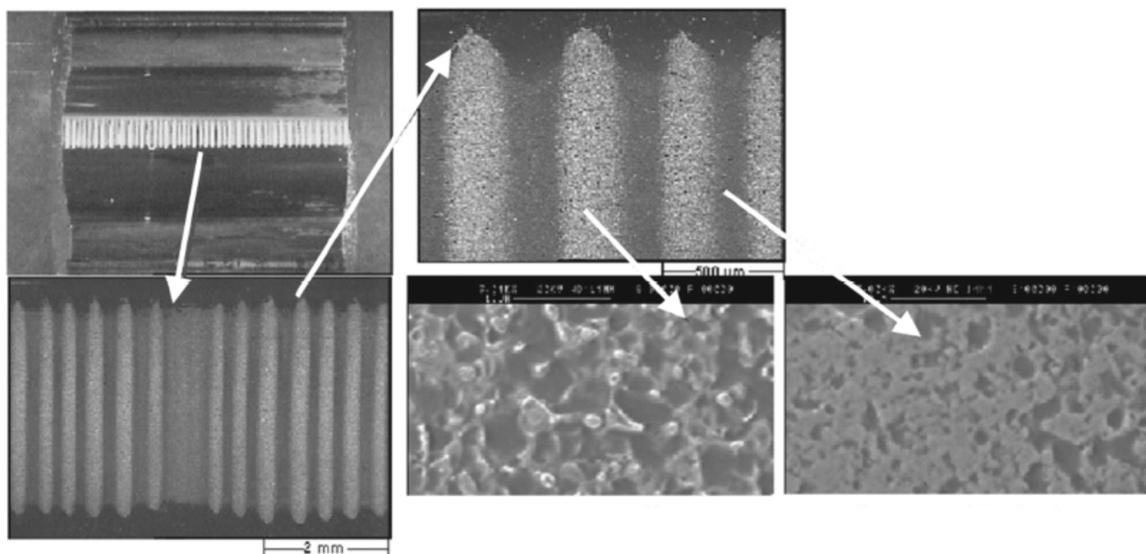


Рис. 7. Увеличение бегунковой дорожки внешнего кольца подшипника

Fig. 7. Increasing the bearing outer ring raceway

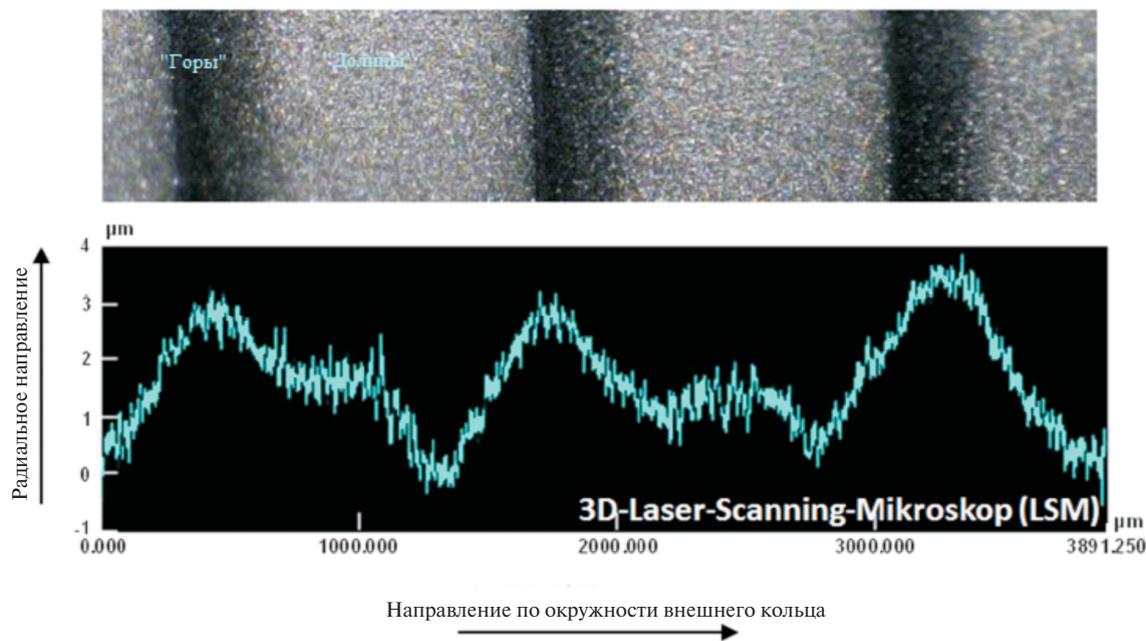


Рис. 8. Замеры рифленой поверхности 3D-лазер микроскопом

Fig. 8. Measurement of corrugated surface

двигателя, поскольку взаимодействие магнитных полей статора и ротора становится пульсирующим. На массивных частях электродвигателя происходит наведение потенциалов, появляется паразитное напряжение, которое вызывают подшипниковые токи. Таким образом, механический дисбаланс приводного электродвигателя – не только следствие подшипниковых токов, но и их причина [17].

Наличие преобразователя частоты. Главной причиной появления подшипниковых токов, протекающих в электродвигателях современных электроприводов с ПП, является синфазное напряжение. Трехфазное напряжение на выходе ПП, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции, имеет форму высокочастотной последовательности импульсов, т.е. несинусоидальную форму. Это приводит к наведению потенциала в массивных частях приводного электродвигателя. Коммутация автономного инвертора ПП осуществляется с высокой частотой. Частота коммутации современных автономных инверторов находится в пределах 1–25 кГц [17].

Внутренняя электростатика. Напряжение на валу приводного двигателя может быть вызвано накоплением внутреннего электростатического заряда.

Внешнее электромагнитное воздействие. Подшипниковые токи в приводных электродвигателях могут возникать под воздействием внешних электромагнитных полей различной природы. По этой причине они могут циркулировать в различных частях электродвигателя длительное время, даже в неработающем электроприводе.

Эксплуатационные характеристики подшипников качения. В соответствии с описанными выше процессами, происходящими в подшипниках, последствия зависят от того, насколько сильно превышено значение критической пробивной напряженности электрического поля в смазочном зазоре подшипника. Преобладающая в нём напряженность поля описывается соотношением напряжения и высоты смазочной пленки. Поскольку высота смазочной пленки обратно пропорциональна емкости подшипника, то при одинаковой контактной поверхности тел качения существует прямая зависимость между напряженностью поля и емкостью подшипника. Ёмкость зависит, помимо прочего, от температуры, частоты вращения и нагрузки на подшипник.

Влияние этих эксплуатационных параметров на частоту возникновения пробоев в подшипниках двигателя исследовано и проанализировано в [13, 18, 19]. При этом помимо вышеописанных зависимостей на частоту пробоев оказывают влияние динамические режимы работы ТМ с переменной частотой вращения.

В [13, 18] в качестве важного параметра прежде всего определена механическая нагрузка на подшипники. Этот параметр может оказывать решающее влияние на структурные изменения дорожек качения подшипников, особенно в эксплуатируемых с низкими нагрузками. Уровень нагрузки на подшипник тесно связан со сроком его службы, который в случае шариковых радиальных подшипников пропорционален коэффициенту C/P . Этот

коэффициент рассчитывается как отношение коэффициента динамической работоспособности $C_{Дун}$ подшипника к результирующей силе, действующей на подшипник качения, выраженной эквивалентным состоянием нагрузки P . При проектировании подшипника необходимо учитывать возможную перегрузку или недостаточную нагрузку. Малые силы трения и отсутствие ускорения при попадании тел качения в зону нагрузки могут приводить к их скольжению (проскальзыванию). Результатом станут повышенный износ подшипников и ускоренная деградация смазки. Минимальная нагрузка $C/P = 100$, при которой обеспечивается скатывание тел качения при условии достаточной смазки. Для соблюдения повышенных требований к сроку службы значение этого соотношения подбирается более высоким.

При наличии погрешностей в определении подшипниковых сил, действующих на электродвигатель, минимальные требования могут быть временно или постоянно занижены.

На основании исследований в таблице показаны возможные факторы, влияющие на распределе-

ние сил в подшипниковом узле двигателя. Различают внешние и внутренние факторы. В первой группе обобщены внешние силы, действующие извне на двигатель и торец оси, во второй группе – внутренние. В каждом случае указывается тип действия и направление нагрузки. 1–9 представляют собой статические и динамические изменения нагрузки, которые могут привести к перегрузке или недостаточной нагрузке подшипника.

Для девяти влияющих параметров, указанных в таблице, могут быть сформулированы следующие дополнительные утверждения:

1, 2 – через нагрузочный механизм компоненты радиального и осевого усилия вводятся в подшипниковую систему двигателя. Допустимые максимальные усилия, как правило, указаны в каталогах производителей двигателей. Неясно, в какой степени проектировщик системы при проектировании и эксплуатации приводного механизма учитывает помимо соблюдения максимальных нагрузок также минимальные значения. Точные нагрузки могут быть даже неизвестны;

Влияние и воздействие на распределение сил в подшипниковой системе двигателя

(↓ – радиальная нагрузка; → – осевая; ∪ – момент)

Influence and influence on the distribution of forces in the bearing system of the engine (↓ – radial load; → – axial; ∪ – moment)

Фактор влияния		Вид	Воздействие/ примечание	↓	→	∪
Внешний	Радиальная нагрузка 1	Ременная передача Радиальная ударная нагрузка	Применение роликовых подшипников при высокой мощности, передаваемых ремнём Различные направления сил в подшипниках (со стороны привода и со стороны нагрузки)	×		×
	Осевая нагрузка 2	Вертикальное исполнение двигателя Косозубая шестерня Зубчатый ротор Осевая ударная нагрузка	Нагрузка возникает в неподвижном подшипнике Может потребоваться специальная конструкция подшипника		×	
	Выравнивание 3	Рассогласование в приводном механизме	Скручивающие усилия, возможны из-за степени свободы внутри муфты	×		×
	Силы сцепления 4	Расстояние между двигателем и нагрузкой	Из-за полной утраты осевого зазора между подшипником и нагрузкой		×	
	Вибрация 5	Внешние вибрационные возбуждения от приводного механизма	Периодическое/импульсное приложение силы в радиальном и осевом направлениях	×	×	
Внутренний	Вес ротора 6	Собственный вес ротора	Сила тяжести с соответствующим действием в зависимости от исполнения двигателя	×	(×)	
	Эксцентricность 7	Выравнивание ротора-статора	Возможна статическая или динамическая эксцентricность Односторонняя магнитная сила	×		
	Дисбаланс 8	Приложение силы по окружности с частотой вращения ротора	Приводит к нагрузке и разгрузке подшипников двигателя	×		×
	Осевой предварительный натяг 9	Установка пружинных элементов	«Базовая нагрузка» для системы подшипников двигателя для компенсации факторов влияния от 1 до 5 Учет теплового расширения (допуски)		×	

3 – при параллельном или угловом смещении валов за пределы допуска могут возникнуть осевые и радиальные усилия, что приведет к дополнительной нагрузке или разгрузке подшипников двигателя. В частности, осевые усилия могут устранить предварительный натяг ρ подшипника;

5 – вибрации и удары передаются на подшипники двигателя через муфту и приводной вал. Эти периодические или импульсные силы вызывают динамические изменения высоты смазочной пленки и таким образом влияют на изоляционные свойства подшипников качения;

6 – в зависимости от конструкции двигателя сила тяжести ротора, действующая в осевом или радиальном направлении, может быть рассчитана, следует также учитывать возможные дополнительные силы, например от прогиба ротора (моменты);

7. 8 – нецентральное (смещенное) расположение ротора-статора приводит к односторонней магнитной силе, которая может быть статической или динамической. Силы могут действовать в направлении силы тяжести и таким образом нагружать или разгружать подшипник. Приложение дополнительных сил из-за дисбаланса также приводит к изменению нагрузки на подшипники;

9 – для того чтобы частично устранить связь подшипников двигателя от факторов влияния и таким образом избежать работы под недостаточной нагрузкой, подшипники двигателя зачастую подвергаются осевому предварительному натягу. Для этого используются спиральные пружины или гофрированные шайбы, которые в зависимости от их характеристической кривой прилагают соответствующее осевое усилие. При этом особое внимание следует обратить на точное выравнивание температурных зависимостей и допусков системы валов и прогиба пружины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тулунов В.Д., Бриедис А.А. Возможность улучшения энергетических показателей электропоездов за счёт модернизации схем силовых цепей. – Вестник МЭИ, 2016, № 4, с. 83–87.
2. Zhuxia Fan, Yongjian Zhi, Bringuan Zhu et al. Research of Bearing Voltage and Bearing Current in Induction Motor Drive System. – 2016 Asia- Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (AP EMC). Shenzhen, China, 2016. pp. 1195–1198. DOI: 10.1109/AP EMC.2016.7522983.
3. Akagi H., Tamuramora S. A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, vol. 21, No. 5, pp. 1459–1469. DOI: 10.1109/TPEL.2006.880239.
4. Kalaiselvi J., Srinivas S. Bearing Currents and Shaft Voltage Reduction in Dual-inverter-fed Open-end Winding Induction Motors with Reduced CMV PWM Methods. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, vol. 62, No. 1, pp.144–152. DOI: 10.1109/TIE.2014.2336614.
5. Saunders L.A., Skibinski G.L., Evon S.T., Kempkes D.L. Riding the reflected wave-IGBT drive technology demands new motor and cable considerations. Petroleum and Chemical Industry Conference, 1996, Records of Conference Papers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated Industry Applications Society 43rd Annual, 1996, pp. 75–84.
6. Busse D., Erdman J., Kerkman R.J., Schlegel D.W., Skibinski G. Bearing currents and their relationship to PWM drives. – Power Electronics, IEEE Transactions No. 12, 1997, 2, pp. 243–252.
7. Shaotang Chen, Lipo T.A., Fitzgerald D. Modeling of motor bearing currents in PWM inverter drives. – Industry Applications. IEEE Transactions No. 32 1996, 6, pp. 1365–1379.
8. Busse D., Erdman J.M., Kerkman R.J., Schlegel D.W., Skibinski G. The effects of PWM voltage source inverters on the mechanical performance of rolling bearings. – Industry Applications. IEEE Transactions No. 33 1997, 2, pp. 567–576.
9. Conraths H.J., Giessler F. u., Heining H.D. Shaft Voltage and Bearing Current- New Phenomena in Inverter Drive Induction Machines. – European Conf. on Power Electronics and Applications, EPE 99- ECCE Europe 1999.
10. Hausberg V., Seinsch H.O. Kapazitive Lagerspannungen und strome bei umrichtergespeisten Induktionsmaschinen. – Archiv fur elektrotechnik 82, 2000, 3/4, pp. 153–162.
11. Jing Quan, Baodong Bai, Yu Wang, Weifeng Liu. Research on Electrostatic shield for Discharge Bearing Currents Suppression in Variable-frequency Motors. – Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems, 2014, pp. 139–143.
12. Muetze A., Binder A., Vogel H., Hering J. Experimental evaluation of the endangerment of ball bearings due to inverter-induced bearing currents. – Industry Applications Conf., 2004 39th Annual Meeting. Conf. Record of the 2004 IEEE, 2004, pp. 1989–1995.
13. Tischmacher H., Gattermann S. Bearing currents in converter operation. – Electrical Machines (ICEM). 2010 XIX Intern. Conf., 2010, pp. 1–8.
14. Tischmacher H., Gattermann S. Multiple signature analysis for the detection of bearing currents and the assessment of the resulting bearing wear. – Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012, pp. 1354–1359.
15. Romanenko A., Ahola J., Muetze A. Influence of electric discharge activity on bearing lubricating grease degradation. – 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2015, pp. 4851–4852.
16. Hurley S., Cann P.M., Spikes H.A. Lubrication and Reflow Properties of Thermally Aged Greases. – Tribology Transactions 43 (2000) 2, 2000, pp. 221–228.
17. Vasilev B.Yu., Kozyaruk A.E. Bearing Currents of Driving Machines in Drives with Semiconductor Transformer. – Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering, 2016, vol.16 No. 3, pp. 93–100.
18. Magdun O., Gemeinder Y., Binder A. Investigation of influence of bearing load and bearing temperature on EDM bearing currents. – Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2010 IEEE, 2010, pp. 2733–2738.
19. Muetze A., Tamminen J., Ahola J. Influence of Motor Operating Parameters on Discharge Bearing Current Activity. – Industry Applications. IEEE Transactions on 47 (2011) 4, 2011, pp. 1767–1777.

[09.11.2020]



А в т о р ы: Тулунов Виктор Дмитриевич – доктор техн. наук, профессор кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ».



Сленцов Михаил Александрович – кандидат техн. наук, доцент, профессор кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ».



Бриедис Александрс Айнарлович – магистр техники и технологии, аспирант, ассистент кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo, 2021, No. 3, pp. 44–53

DOI:10.24160/0013-5380-2021-3-44-53

An Analysis of Damages Inflicted to the Bearings of Rolling Stock Traction Machines Powered by Frequency and Voltage Converters

TULUPOV Viktor D. (*National Research University Moscow, Power Engineering Institute*) – NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Professor of Electrotechnical Complexes of Autonomous Objects and Electric Transport Dept., Dr. Sci. (Eng.)

SLEPTSOV Mikhail A. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor of Electrotechnical Complexes of Autonomous Objects and Electric Transport Dept., Cand. Sci. (Eng.)

BRIEDIS Alexander A. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Assistant of Electrotechnical Complexes of Autonomous Objects and Electric Transport Dept.

The technical and economic efficiency of electric rolling stock (ERS) is determined by the characteristics of its traction electric drives, the key ones of them being the manufacturing cost, repair and maintenance costs, service life, specific energy consumption, and operational reliability. The modern ERS uses induction electric drives with pulse-width control of the voltage and frequency control of the rotation frequency. The field experience gained from operation of electric drives equipped with semiconductor converters has shown a growing number of cases involving accelerated wear of the traction machine bearings. Currents through the bearings or shaft currents, which usually flow from the electrical machine shaft through the bearings, have been known since the time the electrical machines were invented. Owing to recent achievements made in power electronics, the application field of inductor motors has become much wider. In particular, the use of inverters with pulse-width modulation (PWM) and high switching frequency make it possible to operate an electric drive with a lower acoustic noise and with more efficient energy conversion; however, the use of inverters also entails the generation of bearing currents in induction motors. The article analyzes possible factors causing the occurrence of bearing currents. Typical changes occurring in the bearings as a result of electric current flowing through them are shown: the rolling surface becomes dull, grooves on the ball race occur, and lubrication becomes degraded. The influence of operating parameters on the frequency of the occurring breakdowns and the distribution of forces in the bearing system depending on the load are considered. A conclusion is drawn that the potential problem of bearing currents should be solved using design, structural, and algorithmic methods at different stages of design and operation of electrical systems involving adjustable electric drives.

Key words: electric train, traction electric drive, frequency and voltage converter, bearing currents, bearing failures

REFERENCES

1. Tulupov V.D., Briyedis A.A. *Vozmozhnost' uluchsheniya energeticheskikh pokazateley elektropoyezdov za schot modernizatsii skhem silovykh tsepey* (Possibility of improving the energy performance of electric trains due to the modernization of power circuits). Vestnik MEI, 2016, № 4, pp. 83–87.
2. Zhuxia Fan, Yongjian Zhi, Bringquan Zhu et al. Research of Bearing Voltage and Bearing Current in Induction Motor Drive System. – 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Shenzhen, China, 2016. pp. 1195–1198. DOI: 10.1109/APEMC.2016.7522983.
3. Akagi H., Tamuramore S. A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, vol. 21, No. 5, pp. 1459–1469. DOI: 10.1109/TPEL.2006.880239.

4. Kalaiselvi J., Srinivas S. Bearing Currents and Shaft Voltage Reduction in Dual-inverter-fed Open-end Winding Induction Motors with Reduced CMV PWM Methods. – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, vol. 62, No. 1, pp.144–152. DOI: 10.1109/TIE.2014.2336614.
5. Saunders L.A., Skibinski G.L., Evon S.T., Kempkes D.L. Riding the reflected wave-IGBT drive technology demands new motor and cable considerations. Petroleum and Chemical Industry Conference, 1996, Records of Conference Papers. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated Industry Applications Society 43rd Annual, 1996, pp. 75–84.
6. Busse D., Erdman J., Kerkman R.J., Schlegel D.W., Skibinski G. Bearing currents and their relationship to PWM drives. – Power Electronics, IEEE Transactions No. 12, 1997, 2, pp. 243–252.
7. Shaotang Chen, Lipo T.A., Fitzgerald D. Modeling of motor bearing currents in PWM inverter drives. – Industry Applications. IEEE Transactions No. 32 1996, 6, pp. 1365–1379.

8. **Busse D., Erdman J.M., Kerkman R.J., Schlegel D.W., Skibinski G.** The effects of PWM voltage source inverters on the mechanical performance of rolling bearings. *Industry Applications*. IEEE Transactions No. 33 1997, 2, pp. 567–576.
9. **Conraths H.J., Giessler F. u., Heining H.D.** Shaft Voltage and Bearing Current- New Phenomena in Inverter Drive Induction Machines. – European Conf. on Power Electronics and Applications, EPE 99- ECCE Europe 1999.
10. **Hausberg V., Seinsch H.O.** Kapazitive Lagerspannungen und strome bei umrichter gespeisten Induktionsmaschinen. – *Archiv fur elektrotechnik* 82, 2000, 3/4, pp. 153–162.
11. **Jing Quan, Baodong Bai, Yu Wang, Weifeng Liu.** Research on Electrostatic shield for Discharge Bearing Currents Suppression in Variable-frequency Motors. – Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems, 2014, pp. 139–143.
12. **Muetze A., Binder A., Vogel H., Hering J.** Experimental evaluation of the endangerment of ball bearings due to inverter-induced bearing currents. – *Industry Applications Conf.*, 2004 39th Annual Meeting. Conf. Record of the 2004 IEEE, 2004, pp. 1989–1995.
13. **Tischmacher H., Gattermann S.** Bearing currents in converter operation. – *Electrical Machines (ICEM)*. 2010 XIX Intern. Conf., 2010, pp. 1–8.
14. **Tischmacher H., Gattermann S.** Multiple signature analysis for the detection of bearing currents and the assessment of the resulting bearing wear. – *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2012, pp. 1354–1359.
15. **Romanenko A., Ahola J., Muetze A.** Influence of electric discharge activity on bearing lubricating grease degradation. – 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2015, pp. 4851–4852.
16. **Hurley S., Cann P.M., Spikes H.A.** Lubrication and Reflow Properties of Thermally Aged Greases. – *Tribology Transactions* 43 (2000) 2, 2000, pp. 221–228.
17. **Vasilev B.Yu., Kozyaruk A.E.** Bearing Currents of Driving Machines in Drives with Semiconductor Transformer. – *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol.16 No. 3, pp. 93–100.
18. **Magdun O., Gemeinder Y., Binder A.** Investigation of influence of bearing load and bearing temperature on EDM bearing currents. – *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2010 IEEE, 2010, pp. 2733–2738.
19. **Muetze A., Tamminen J., Ahola J.** Influence of Motor Operating Parameters on Discharge Bearing Current Activity. – *Industry Applications*. IEEE Transactions on 47 (2011) 4, 2011, pp. 1767–1777.

[09.11.2020]