

УДК 621.33.004.68.001.2

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-60-70

Методы повышения надежности работы подшипниковых узлов в тяговых асинхронных машинах

В.Д. Тулупов, М.А. Слепцов, А.А. Бриедис

Рассмотрена проблема выходов из строя тяговых машин на электроподвижном составе по причине электроэрозии подшипников. Повреждения подшипников тяговых машин в результате прохождения электрического тока известны давно, но последнее время данный вид повреждений участился, поскольку преобразователи частоты и напряжения для управления трехфазными асинхронными двигателями получили широкое распространение на электроподвижном составе.

Представлен обзор причин возникновения паразитных токов и их источников, генерируемых в тяговых машинах с частотным управлением. Прохождение электрического тока через подшипники качения происходит в области контакта элементов качения с внутренним или наружным кольцом, соответственно, в результате повреждаются поверхности качения металлических компонентов подшипника и снижается качество смазочных материалов.

Для исследования и анализа подшипниковых токов определены «паразитные емкости», присутствующие в тяговых машинах, и способы их расчета, поскольку они влияют на генерацию паразитных токов. Паразитными емкостями тяговых машин являются: емкость между обмотками статора и пакетом активной стали статора, емкость между обмотками статора и ротором, емкость между ротором и пакетом активной стали статора, емкости подшипников. С электрической точки зрения подшипники также можно рассматривать как емкости. Пока между внутренним и наружным кольцом и телами качения существует непрерывная смазочная пленка, подшипники действуют как конденсаторы. Разность потенциалов на элементах подшипника приводит к электростатическим разрядам и, следовательно, к токам разряда.

Один из способов повышения надежности подшипниковых узлов тяговых машин — применение изолированных подшипников. Выполнены расчет и анализ изменения сопротивления подшипников с керамическим покрытием и гибридными телами качения в зависимости от частоты прикладываемого напряжения и рабочей температуры. Сделаны выводы о целесообразности применения гибридных подшипников с кольцами из подшипниковой стали и телами качения из подшипникового нитрида кремния (Si_3N_4).

Ключевые слова: преобразователь частоты и напряжения, подшипниковый ток, тяговый привод, подшипник.

Для цитирования: Тулупов В.Д., Слепцов М.А., Бриедис А.А. Методы повышения надежности работы подшипниковых узлов в тяговых асинхронных машинах // Вестник МЭИ. 2021. № 2. С. 60—70. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-60-70.

Ways to Improve the Reliability of Bearings in Traction Induction Machines

V.D. Tulupov, M.A. Sleptsov, A.A. Briedis

The problem of electric rolling stock traction machinery failures caused by electrical erosion of bearings is addressed. Damages inflicted to traction machinery bearings as a result of electric current flowing through them have been known since long ago. In recent time, however, damages of this kind have become more frequent, because frequency and voltage converters for control of three-phase inductor motors are widely used in the electric rolling stock. An overview of factors causing the occurrence of stray currents generated in frequency converter driven traction motors and sources of these currents is presented. Electric current flows through rolling bearings in the area of the contact between the rolling elements with inner and outer rings, thus causing damage to the bearing metal components' rolling surfaces and degrading the quality of lubricants.

To study and analyze the currents through bearings, the stray capacitances existing in traction machines are determined, and their calculation methods are defined, the necessity of which is stemming from the fact that these capacitances influence the generation of parasitic currents. The stray capacitances in traction machines include the capacitance between the stator windings and the stator core pack, the capacitance between the stator windings and the rotor, the capacitance between the rotor and the stator core pack, and the capacitances of the bearings. From the electrical point of view, bearings may also be regarded as capacitances. As long as there is a continuous lubricant film between the inner ring and outer rings and the rolling elements, the bearings behave as capacitors. A difference of potentials across the bearing elements may lead to electrostatic discharges and, hence, to discharge currents through the bearings.

One of possible ways to enhance the reliability of traction machine bearing units is to use insulated bearings. The change in the impedance of bearings with ceramic coating and hybrid rolling elements depending on the applied voltage frequency and operating temperature is calculated and analyzed. Conclusions regarding the expediency of using hybrid bearings having rings made of bearing steel and rolling elements made of bearing silicon nitride (Si_3N_4) are drawn.

Key words: frequency and voltage converter, bearing current, traction drive, bearing.

For citation: Tulupov V.D., Sleptsov M.A., Briedis A.A. Ways to Improve the Reliability of Bearings in Traction Induction Machines. Bulletin of MPEI. 2021;2:60—70. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-60-70.

Введение

Технико-экономическую эффективность электроподвижного состава (ЭПС) определяют с помощью показателей используемого на нем тягового электропривода (ТЭП), главными из которых являются: стоимость изготовления, затраты на ремонт и обслуживание, срок службы, удельный расход энергии и надежность работы.

Развитие силовой электроники позволило усовершенствовать тяговое электрооборудование моторных вагонов, применить тяговые машины (ТМ) переменного тока, микропроцессорные системы управления и диагностики, что повысило надежность и ускорило проведение ремонта и обслуживания ЭПС.

Современные быстродействующие IGBT-инверторы (биполярные транзисторы с изолированным затвором) обеспечивают высокую динамику работы приводов с переменной скоростью вращения, одновременно экономя энергию. Однако из-за резких скачков напряжения подшипники подвергаются воздействию индукционных токов, вызванных инвертором.

На рисунке 1 приведена статистика выходов из строя асинхронных тяговых машин (АТМ) на ЭПС, питание и управление которых осуществляется от инвертора. Почти 72% всех выходов связаны с протеканием токов в подшипниковом узле, 25% — пробой изоляции статорной обмотки, 3% — другие причины (влага в клеммной коробке и, как следствие, пробой на корпус, дефекты, полученные при транспортировке, повреждение муфты).

Повышенные выходы из строя подшипников АТМ ставят перед инженерами задачу увеличения надежности данных узлов. Для исследования повреждений необходимо определить возможные напряжения на АТМ, причины возникновения токов в подшипниковом узле, паразитные емкости и способы их расчета.

Исходя из данных литературных источников [1—13], рассмотрены причины возникновения подшипниковых токов, описаны паразитные емкости АТМ и способы их расчета.

Для повышения надежности подшипниковых узлов используют различные способы изоляции подшипни-

ков. Необходимо сравнить подшипники с керамическим покрытием и подшипники с телами качения — из керамики (нитрида кремния (Si_3N_4)).

Напряжения на тяговых машинах

На рисунке 2 продемонстрированы различные напряжения трехфазной системы электропривода.

Напряжение между фазой и заземлением (U_{ug}, U_{vg}, U_{wg}) — это разность потенциалов между отдельной фазой и землей, иными словами, это напряжение, измеренное между клеммой отдельной фазы и заземляющим соединением инвертора или двигателя. При работе инвертора напряжение фаза–земля меняется в зависимости от частоты переключения (частоты прерывания) инвертора $f_{инв}$.

Напряжение между фазами (U_{uv}, U_{vw}, U_{uw}) является разностью потенциалов между двумя фазами многофазной системы (напряжением, измеренным на клеммах). При работе инвертора оно меняется с удвоенной частотой переключения ключей инвертора $f_{инв}$.

Напряжение между фазой и нейтралью (U_{un}, U_{vn}, U_{wn}) представляет собой разность потенциалов между отдельной фазовой и нейтральной точками фазовых соединений (например, точка звезды в системе с Y-соединением). При работе инвертора оно варьируется с частотой переключения ключей инвертора $f_{инв}$.

Синфазное напряжение $U_{сн}$ (в литературе часто обозначается как U_0) определяется как среднее арифметическое напряжение фаз к земле. При работе инвертора оно изменяется с трехкратной частотой переключения ключей инвертора $f_{инв}$:

$$U_{сн} = \frac{U_{ug} + U_{vg} + U_{wg}}{3}$$

Напряжение между нейтралью и землей U_{ng} — разность потенциалов между нейтральной точкой фазовых соединений (например, звездой в системе с Y-соединением) и заземляющим соединением U_g . При работе инвертора оно меняется с трехкратной частотой переключения ключей инвертора $f_{инв}$.

Напряжение подшипника $U_{п}$ выглядит как разность потенциалов между внутренним и внешним кольцами подшипника. В тяговых машинах различают два вида: $U_{под.привод}$ и $U_{под.непривод}$. При работе инвертора, когда в синфазном напряжении возникает высокочастотная составляющая, а между телами качения и бегунковой дорожкой подшипника присутствует смазка высотой h , подшипник функционирует как конденсатор.

Напряжение на валу машины $U_{в}$ — напряжение, измеренное между двумя концами вала тяговой машины.

Подшипниковые токи

Исходя из скачков напряжения, типичных для преобразователя, выделим токи от du/dt , EDM (дуговой разряд накопленных зарядов), круговые и роторные



Рис. 1. Диаграмма причин выхода из строя тяговых электродвигателей

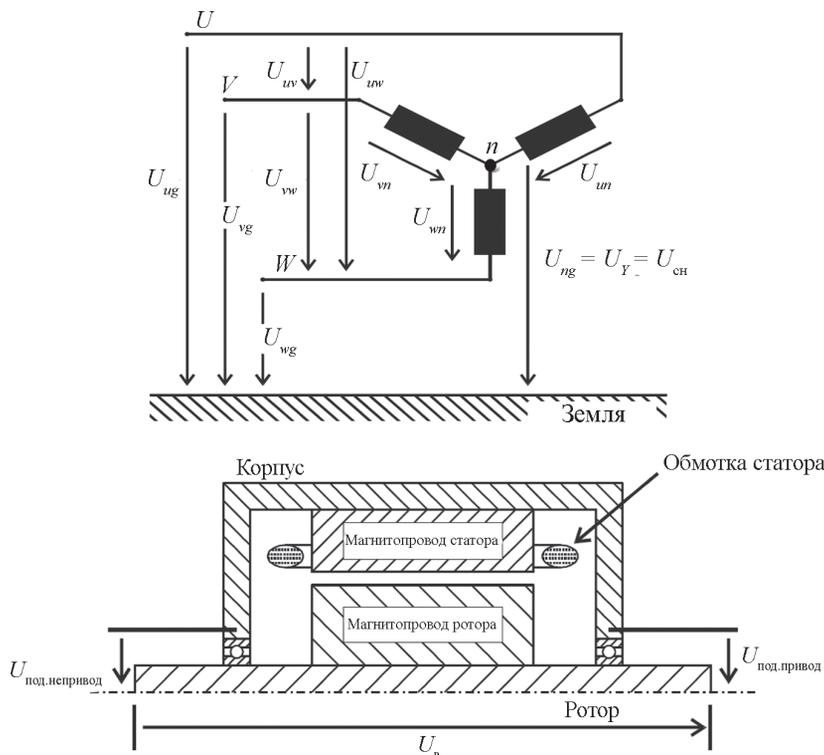


Рис. 2. Напряжения в трехфазной системе электропривода:

U_{ug}, U_{vg}, U_{wg} — напряжения фазы к земле; U_{uv}, U_{vw}, U_{wv} — межфазные напряжения; U_{un}, U_{vn}, U_{wn} — напряжения между фазой и нейтралью; U_{cn} — синфазное напряжение; U_{ng} — напряжение между нейтралью и землей; $U_{под.привод}, U_{под.непривод}$ — напряжения подшипника; $U_{в}$ — напряжение вала

блуждающие токи. В зависимости от вида заложенных в них механизмов, определим две основных группы [1]. Первая характеризуется высокочастотными составляющими синфазного тока (круговые и роторные блуждающие токи), вторая — синфазным напряжением (токи от du/dt и EDM).

На рисунке 3 схематически представлены отдельные типы подшипниковых токов, а также выделены основные компоненты системы привода: электродвигатель, преобразователь и нагрузочное устройство.

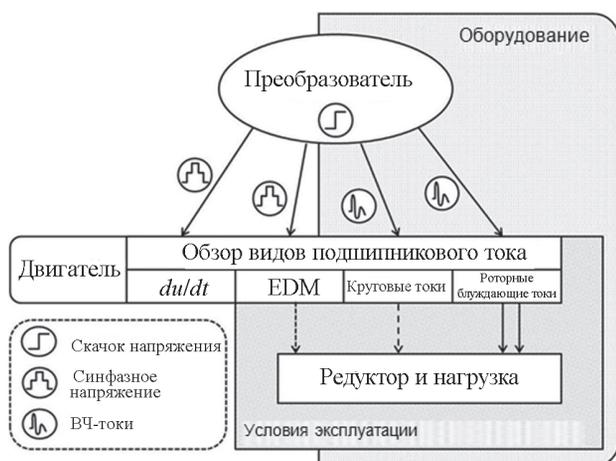


Рис. 3. Схема возможных типов подшипниковых токов

Емкостная эквивалентная схема двигателя

Согласно работам [2 — 5], паразитные емкости компонентов двигателя можно представить в эквивалентной схеме, отображающей высокочастотные свойства синфазного контура. Ее основой является перенос взаимодействия между основными компонентами двигателя (обмотки статора, ротора и подшипникового узла) в емкостные эквивалентные величины, с помощью которых доступно описание механизмов подшипниковых токов.

На рисунке 4 дана эквивалентная емкостная схема двигателя с распределением емкостей по основным группам. Подшипниковые узлы двигателя на рис. 4 представлены емкостью $C_{п}$, характеризующейся отсутствием гальванического контакта компонентов качения ввиду изолирующей смазочной пленки на контактных поверхностях.

Рассмотрим емкостные составляющие тягового электродвигателя.

Емкость подшипника

С учетом того, что контактные поверхности компонентов качения полностью разделены смазочным материалом (полная смазка), электрические свойства подшипника могут быть выражены через емкости. Условия смазки в контакте подшипников качения можно описать с помощью гидродинамической теории. Наряду

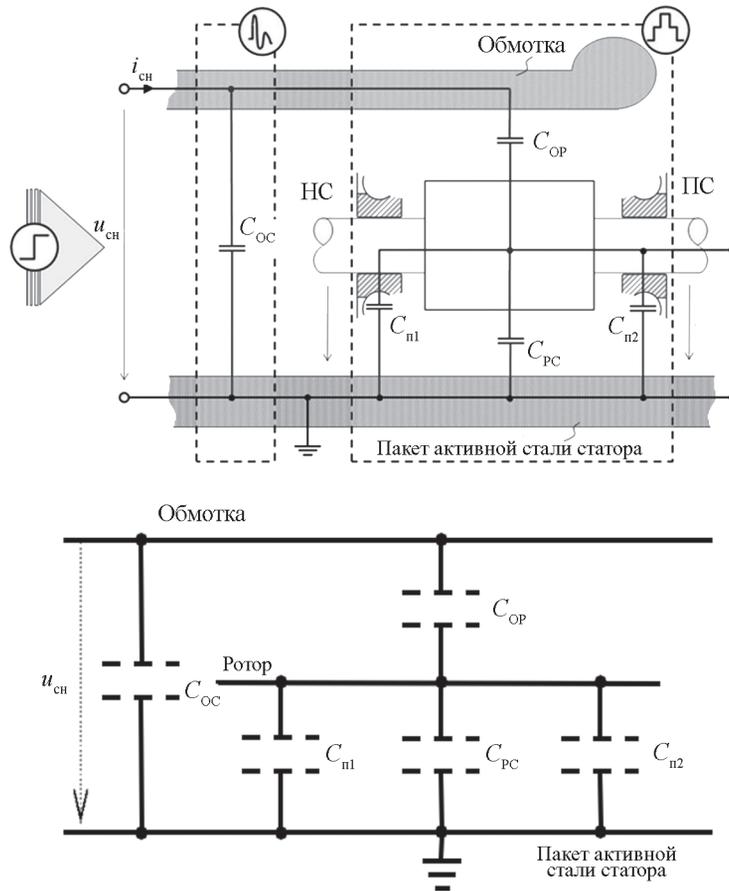


Рис. 4. Емкостная эквивалентная схема двигателя:

$C_{ос}$, $C_{ор}$ — емкости между обмоткой и пакетом активной стали статора и обмоткой и ротором; $C_{рс}$ — паразитная емкость между ротором и пакетом активной стали статора

ду с упругой деформацией контактных поверхностей при высоких нагрузках (давление Герца) в данном подходе учтено поведение смазочного материала в зависимости от давления и температуры. Согласно [6], площадь между телом качения и кольцом подшипника делится на три зоны: входную, контактную зону Герца и выходную. Каждая из зон характеризуется определенной емкостью (рис. 5). Сумма трех емкостей представляет собой контактную емкость C_k тел качения.

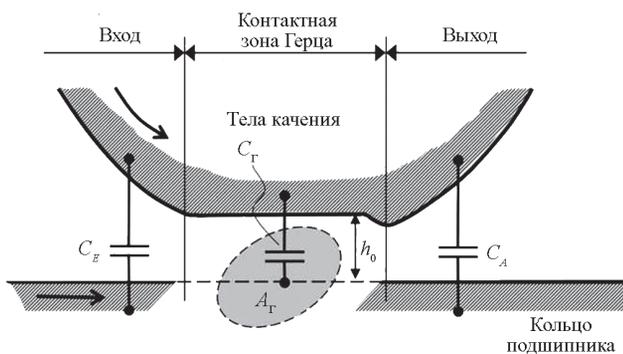


Рис. 5. Емкости в контактной зоне между телом качения и кольцом подшипника

Емкости входной и выходной зон сильно зависят от кривизны дорожки качения и расстояния между дорожкой и телом качения, соответственно, контактную емкость C_k выразим с помощью введения поправочного коэффициента k_L [7]:

$$C_k = k_L C_r = k_L \epsilon_0 \epsilon_r (A_r / h_0). \quad (1)$$

В (1), помимо k_L , учитываются абсолютная диэлектрическая проницаемость смазочного материала ϵ_r и соотношение контактной поверхности A_r к высоте смазочной пленки h_0 (по нормали к поверхности контакта).

В источниках значение поправочного коэффициента k_L указывается по-разному: в [7] $k_L = 3,5$, в [8] — 1,1. Согласно [9], k_L зависит от высоты смазочной пленки и колеблется в диапазоне от 1,2 до 2,9 в соответствии с результатами исследования, основанного на оптических измерениях.

Теоретический расчет контактной емкости C_k приближителен из-за погрешностей k_L и возможного определения высоты смазочной пленки h_0 .

В случае смазки маслом, в эллиптическом точечном контакте высота смазочной пленки может быть определена как [10]:

$$H_0 = \frac{2,69G^{0,49}V_0^{0,68}}{W_0^{0,067}}(1 - 0,61e^{-0,73k}),$$

где

$$\begin{aligned} G &= a_p E_0; \\ V_0 &= (n_0 v)/(E_0 R_x); \\ W_0 &= P/(E_0 R_x^2); \\ H_0 &= h_0/R; \\ k &= a/b; \\ 1/R_x &= 1/R_{1x} + 1/R_{2x}; \end{aligned}$$

a, b — перпендикулярная и параллельная направлению движения полуоси, мм; E_0 — модуль упругости материала контактных тел, Н/мм²; a_p — барометрический коэффициент вязкости, мм²/Н; n_0 — динамическая вязкость масла на входе контакта, Н/мм²; v — скорость вращения, мм/с; R — основной радиус кривизны, мм; R_x — основной радиус кривизны в плоскости движения, мм; P — нагрузка на роликовый (шариковый) контакт, Н.

В этом случае величины упругой деформации тел качения и вязкостные характеристики смазочного материала соотносятся в зависимости от давления и температуры.

При известной емкости подшипника можно выполнить обратный расчет и найти высоту смазочной пленки, используя (1). Этот известный способ применялся в ходе исследования, описанного в [3].

Емкость между обмоткой и пакетом активной стали статора

Емкость между обмоткой статора и корпусом (пакетом активной стали статора) пропорциональна отношению общей площади оболочки паза $A_{\text{паз}}$ и толщины слоя изоляции обмотки d_{Iso} по отношению к пакету сердечника статора. На основе параметров, приведенных на рис. 6, общая площадь оболочки паза $A_{\text{паз}}$ определяется с помощью следующего уравнения:

$$A_{\text{паз}} = (\pi R + 2\sqrt{(T-R)^2 + \left(R - \frac{B}{2}\right)^2} - 2 \times t_{\text{обм}})l_{\text{Fe}}.$$

В соответствии с [11] емкость обмотки рассчитывается как:

$$C_{\text{OC}} = Q_1 \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A_{\text{паз}}}{D_{\text{Iso}}},$$

где Q_1 — количество пазов; ε_r — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; d_{Iso} — толщина изоляционного слоя (расстояние от материала проводника до стенки паза).

Указанная аппроксимация предусматривает постоянную толщину изоляции. Данное положение не распространяется на низковольтные двигатели с «неорганизованной обмоткой», заполнение пазов которых формируется большим количеством проводников круглого сечения, размещающихся в пазе в «неорганизованном» порядке в ходе технологического процесса.

В паз помещается только ограниченное количество меди, которая, в лучшем случае, образует своего рода сплошную волнообразную структуру на стенке паза (силуэт проволоки приведен на рис. 7, а, б). Полученные зазоры частично заполняются пропиточной смолой. В результате увеличенный промежуток между обмоткой и пакетом активной стали статора выражается в увеличении результирующей толщины изоляционного материала. В [8] это обстоятельство учтено только в уменьшении поверхности оболочки паза в 0,9 раза.

В диапазоне стандартных двигателей мощностью до 200 кВт закрытие пазов обычно проходит с помощью подвижных щитков, сделанных из фальцованного слоистого материала, характеризующегося большей толщиной слоя, чем основная изоляция. Эти U-образные элементы вдавливаются в область между обмоткой, изоляцией и стенкой паза. Длина стороны щитка составляет до одной трети глубины паза (рис. 7, а). Результат закрытия пазов — дальнейший рост расстояния между медью и пакетом сердечника.

В повышенном диапазоне мощностей у нестандартных двигателей пазовый затвор выполнен из клиньев,

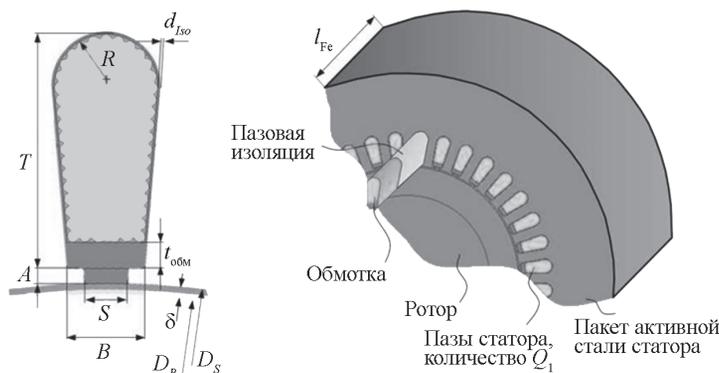


Рис. 6. Определение необходимых габаритных размеров двигателя

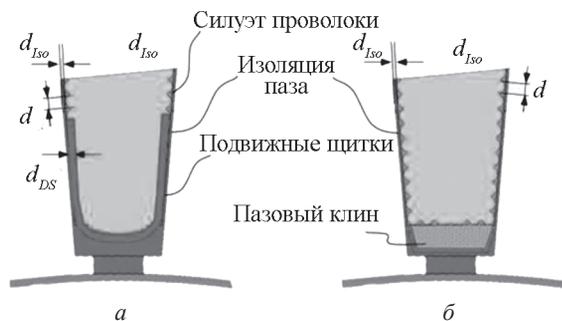


Рис. 7. Изображение различных вариантов пазового затвора: а — подвижные щитки из фальцованного слоистого материала; б — клинья, изготовленные из композитного материала или из слоистого материала с войлочной вставкой

изготовленных либо из композитного, либо из слоистого материала с войлочной вставкой (рис. 7, б). Во время процесса пропитки войлок заполняется смолой и оказывает противодействие на обмотку в процессе отвердевания, в результате возможно небольшое увеличение объема паза. Согласно [12], из-за технологических допусков искажений листовой стали, вызванных высвобождаемыми внутренними напряжениями, и пакетирования статорных листов, создается небольшое смещение между отдельными листами, которое приводит к дальнейшему росту расстояния между обмоткой и стенкой паза. Диапазон этого так называемого размера перфорации — от 0,2 до 0,3 мм [12]. Поскольку указанное смещение по всей длине двигателя протекает стохастически, то в рамках расчета данный аспект учитывается путем увеличения толщины изоляционного материала d_{Iso} на 0,05 мм. Коэффициенты абсолютной диэлектрической проницаемости пазовой изоляции рассматриваемых двигателей располагаются в диапазоне 2,7...3,2.

Емкость между ротором и пакетом активной стали статора

Емкость между пакетом активной стали статора и ротором зависит от геометрических условий в области воздушного зазора двигателя. Для определения C_{PC} можно использовать общее уравнение для расчета цилиндрического конденсатора. При этом емкость пропорциональна соотношению длины пакета сердечника l_{Fe} и логарифма отношения внутреннего диаметра статора к диаметру ротора. Согласно [4], путем линеаризации и введения коэффициента Картера k_c получим приближенное уравнение:

$$C_{PC} = \epsilon_0 l_{Fe} \frac{\pi D_r}{k_c \delta} \quad (2)$$

Коэффициент Картера, известный из расчета распределения магнитного потока в области воздушного зазора, в соответствии с [13] выглядит как отношение максимальной плотности потока к средней в воздушном зазоре и в случае одностороннего расположения пазов рассчитывается как

$$k_c = \frac{B_{\delta_{max}}}{B_{\delta_{cp}}} = \frac{\tau_N}{\tau_N - \gamma S},$$

где τ_N — распределение пазов статора, $\tau_N = \pi D_s / Q_1$; γ — вспомогательный коэффициент, который с допущением бесконечно проницаемого пакета сердечника выражается как отношение ширины щели к ширине воздушного зазора $h = S/\delta$:

$$\gamma = h/(h+5).$$

При моделировании емкостей между ротором и пакетом активной стали статора наблюдается увеличение их значений по мере роста мощности двигателя. Согласно (2), емкость C_{PC} пропорциональна диаметру ротора и длине пакета сердечника. Из первого параметра определяется прямая зависимость C_{PC} от высоты оси, из второго — зависимость от длины.

Емкость между обмоткой и ротором

Разделим емкостную связь между обмоткой и ротором на две составляющих. Первая $C_{OP,паз}$ определяется геометрическими условиями области пазовой щели, вторая $C_{OP,лоб}$ — площадью и расстояниями между лобовыми частями обмотки и короткозамыкающими кольцами ротора. Общая емкость — результатом параллельного включения данных элементов.

Пазовая часть емкости между обмоткой и ротором. В области пазовой щели между обмоткой и ротором образовывается электрическое поле. Ширина S пазовой щели, умноженная на длину пакета сердечника l_{Fe} и количество пазов статора Q_1 , образует площадь, которая, при делении на расстояние между обмоткой и ротором (сумму воздушного зазора δ , высоты пазовой щели A и глубины обмотки $t_{обм}$ (величины, описывающей среднее расстояние между медью в пазу и нижней кромкой области пазовой щели)), пропорциональна емкостной связи этой области. Из-за различных диэлектрических свойств среды расстояние от обмотки до ротора должно быть разделено на воздушное ($\epsilon_r = 1$) и изоляционное ($\epsilon_{r,Iso}$). Общая емкость — результат последовательного включения обеих частей (рис. 8, а, б).

Описанные составляющие рассчитываются с помощью следующих уравнений.

Вариант с подвижным щитком толщиной d :

$$C_{CP,Iso} = \epsilon_0 \epsilon_{r,Iso} \frac{S l_{Fe}}{d_{щ}} Q_1;$$

$$C_{CP,з} = \epsilon_0 \frac{S l_{Fe}}{t_{обм} - d_{щ} + A + \delta} Q_1.$$

Вариант с пазовым клином:

$$C_{CP,Iso} = \epsilon_0 \epsilon_{r,Iso} \frac{S l_{Fe}}{t_{обм}} Q_1;$$

$$C_{CP,з} = \epsilon_0 \frac{S \times l_{Fe}}{A + \delta} Q_1.$$

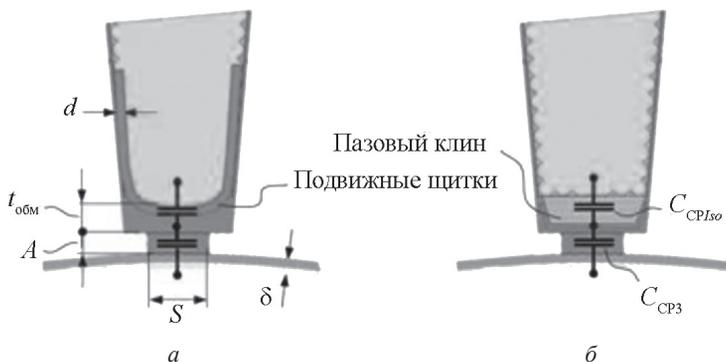


Рис. 8. Определение размеров различных вариантов пазового затвора:
 а — с подвижным щитком толщиной d ; б — с пазовым клином

Емкость между обмоткой и ротором в области зазора:

$$C_{OP,паз} = \frac{1}{(1/C_{CP150}) + (1/C_{CP3})}$$

Помимо габаритных размеров для расчета важны диэлектрические свойства изоляционного материала.

Значение емкости меняется в зависимости от толщины слоя и типа применяемого изоляционного материала, диэлектрическая проницаемость которого варьируется в диапазоне от 2,7 до 3,2.

В качестве подвижных щитков используются слоистые композитные материалы. В этом случае абсолютная диэлектрическая проницаемость — результат последовательного включения отдельных значений и принимает значения $\epsilon_{r,iso} = 1,5...2$.

Емкостная составляющая между лобовой частью обмотки и ротором.

При емкостной связи между обмоткой и ротором через область пазовой щели статора у асинхронных

двигателей с короткозамкнутым ротором появляется дополнительная составляющая, а именно, — между лобовой частью обмотки и короткозамыкающим кольцом.

При расчете и моделировании такой емкости должны учитываться: размеры выступа лобовой части $L_{лоб}$, короткозамыкающего кольца L_k , среднее расстояние от короткозамыкающего кольца до лобовой части обмотки a_{op} и высота h_k (рис. 9).

Параллельное включение пазовой и лобовой частей обмотки ведет к возникновению общей емкостной связи между обмоткой и ротором.

Для всех типов двигателей наблюдается увеличение емкости C_{op} по мере роста мощности АТМ.

Меры борьбы с подшипниковыми токами

Для уменьшения негативного эффекта воздействия проанализированных емкостных составляющих АТМ, существует несколько способов защиты подшипников.

Изоляция внешнего или внутреннего кольца подшипника методом плазменного напыления. Суть метода плазменного напыления состоит в следующем.

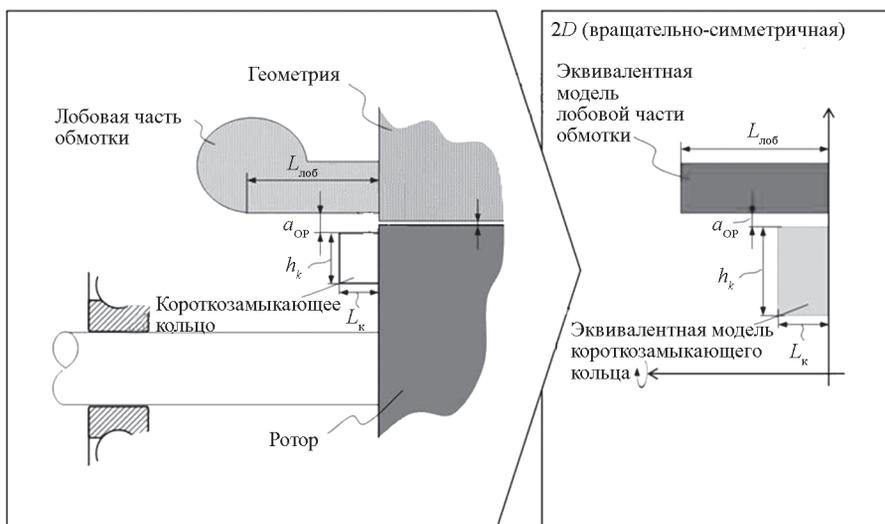


Рис. 9. Определение размеров лобовой части обмотки (слева) и перенос в эквивалентную модель для численного расчета (справа)

Между двумя электродами создается световая дуга и происходит ионизация подаваемого инертного газа. Возникающая свободная плазменная струя действует в качестве несущего луча для подводимого порошка оксида алюминия. Порошок плавится и с высокой скоростью наносится на наружное или внутреннее кольцо подшипника. Нанесенный таким способом оксидный слой хорошо держится на поверхности кольца. После нанесения идут герметизация и шлифование до достижения необходимого размера. Такое покрытие обеспечивает изоляцию до 1000 В.

Различают два механизма защиты.

Сопротивление постоянному току. Данная защита при комнатной температуре обладает сопротивлением от 1 до 10 ГОм в зависимости от размера подшипника. С повышением температуры сопротивление снижается по экспоненциальному закону (приблизительно 40...50% каждые 10 °С). При рабочей температуре 60...80 °С сопротивление изоляции составляет несколько МОм, что (в соответствии с законом Ома) при напряжении до 1000 В создает ток, протекающий через подшипник, силой ниже 1 мА. Токи подобной величины не являются критичными для подшипника:

$$I_{\text{подш}} = U_{\text{подш}} / R_{\text{подш}}$$

Сопротивление переменному току. Изолированный подшипник обладает емкостью C_n . Под влиянием переменного напряжения это приводит к прохождению переменного тока через контактную поверхность тел качения и дорожек. В случае гармонического сигнала с круговой частотой для эффективных значений тока и напряжения справедлива формула:

$$I_{\text{подш}} = U_{\text{подш}} \omega C_n$$

Емкостное сопротивление подшипника равно:

$$Z_{\text{подш}} = 1/(\omega C_n)$$

Емкость подшипника с покрытием из оксида кремния, как правило, составляет от 2 до 20 нФ в зависимости от размера подшипника. Его емкостное сопротивление располагается в диапазоне от 0,15 до 1,5 МОм

при частоте 50 Гц (ниже сопротивления постоянному току). С увеличением частоты значение сопротивления подшипника уменьшается, но все же оно существенно выше, чем неизолированного, которое при напряжении свыше 1 В приобретает значение 1 Ом и менее.

Гибридные подшипники. В качестве альтернативы подшипникам с изоляционным покрытием идет разработка гибридных подшипников. Их кольца выполнены из подшипниковой стали, а тела качения — из керамики (нитрида кремния (Si_3N_4)). Подобные тела качения обладают очень высокой износостойкостью и токоизолирующими свойствами. Гибридные подшипники изготавливаются как в виде шарикоподшипников, так и цилиндрических роликоподшипников.

Преимущество гибридных подшипников заключается в высоком электрическом сопротивлении. При более высокой температуре сопротивление лежит в ГОм-области, электроемкости примерно равны 40 пФ, что в 100 раз ниже, чем у подшипников с керамическим покрытиями (таблица).

Сравним сопротивления подшипника с керамическим покрытием и подшипника с гибридными телами качения.

Выполним расчет и анализ изменения сопротивления подшипников с керамическим покрытием и гибридных в зависимости от частоты прикладываемого напряжения и рабочей температуры.

На рисунке 10 изображена схема замещения подшипника с керамическим покрытием. Подшипник обладает активным сопротивлением и из-за наличия керамического слоя и пленки смазки между телами и дорожками качения — емкостным. Полное сопротивление подшипника рассчитывается следующим образом:

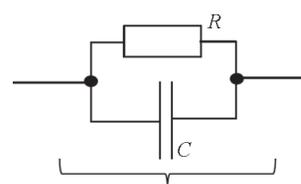


Рис. 10. Схема замещения подшипника с керамическим покрытием

Сравнение характеристик подшипников с керамическим покрытием и гибридными телами качения

| Параметр | Материал подшипников | |
|--|--------------------------------------|------------------------------|
| | керамика (нитрид кремния Si_3N_4) | сталь (100 Cr ₆) |
| Удельное электрическое сопротивление Ω, мм ² /м | 10 ¹⁷ | 10 ⁻¹ |
| Плотность, г/см ³ | 3,2 | 7,8 |
| Емкость, пФ | 2000...20000 (2...20 нФ) | 40 |
| Сопротивление, МОм (20 °С) | 1...10000 | 1...1000 |
| Модуль упругости, МПа | 315000 | 210000 |
| Коэффициент Пуассона | 0,26 | 0,3 |
| Твердость | 1600...800 | 700...150 |

$$Z_{\text{подш}} = \frac{R_{\text{подш}}}{\omega R_{\text{подш}} C_{\text{п}} + 1}.$$

С повышением температуры активное сопротивление подшипника снижается по экспоненциальному закону на 40...50% на каждые 10 °С.

Для подшипников с керамическим покрытием в зоне низких частот (до 1 кГц) сопротивление подшипника при рабочих температурах (до 100 °С) составляет не менее 16 кОм, следовательно, ток, способный вы-

звать электрокоррозию около 1 мА, может быть создан напряжением от 16 В. При температурах подшипника до 50 °С сопротивление — не ниже 100 кОм, а для создания тока 1 мА необходимо напряжение не менее 100 В (рис. 11, 12).

В зоне высоких частот (от 100 кГц до 1 МГц) сопротивление подшипника при $C_{\text{п}} = 2$ нФ снижается с 783 до 79 Ом, ток, способный вызвать электрокоррозию около 1 мА, может быть создан напряжением от 0,783 В при 100 кГц и от 0,079 В при 1 МГц.

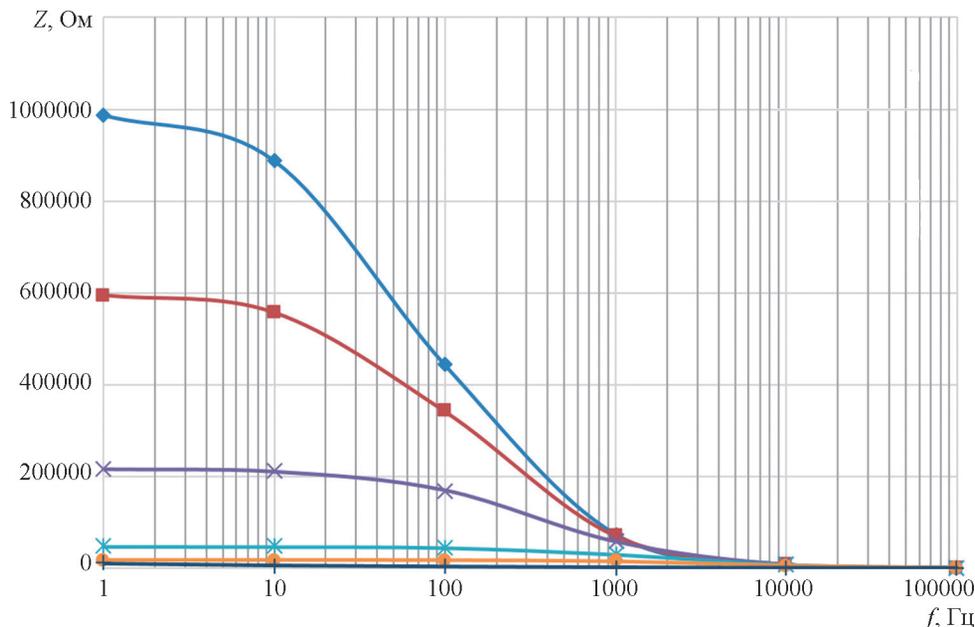


Рис. 11. Сопротивление изолированного подшипника в зависимости от частоты приложенного напряжения и температуры:

◆ — 20 °С (2 нФ); ■ — 30 °С (2 нФ); × — 50 °С (2 нФ); * — 80 °С (2 нФ); ● — 100 °С (2 нФ); — — 200 °С (2 нФ)

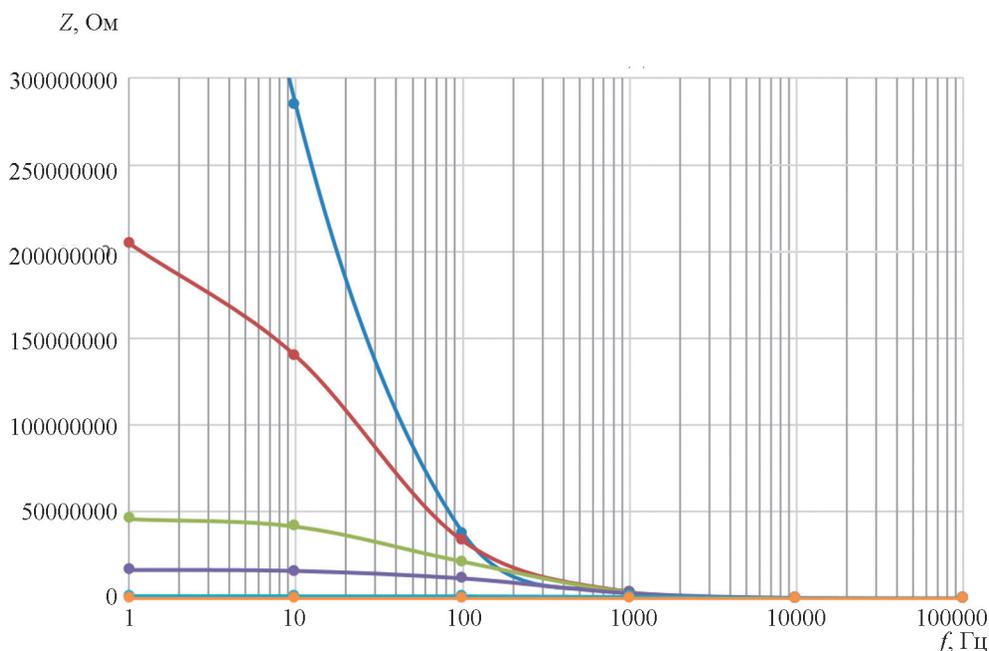


Рис. 12. Сопротивление гибридного подшипника в зависимости от частоты приложенного напряжения и температуры:

● — 20 °С (40 пФ); ● — 50 °С (40 пФ); ● — 80 °С (40 пФ); ● — 100 °С (40 пФ); ● — 150 °С (40 пФ); ● — 200 °С (40 пФ)

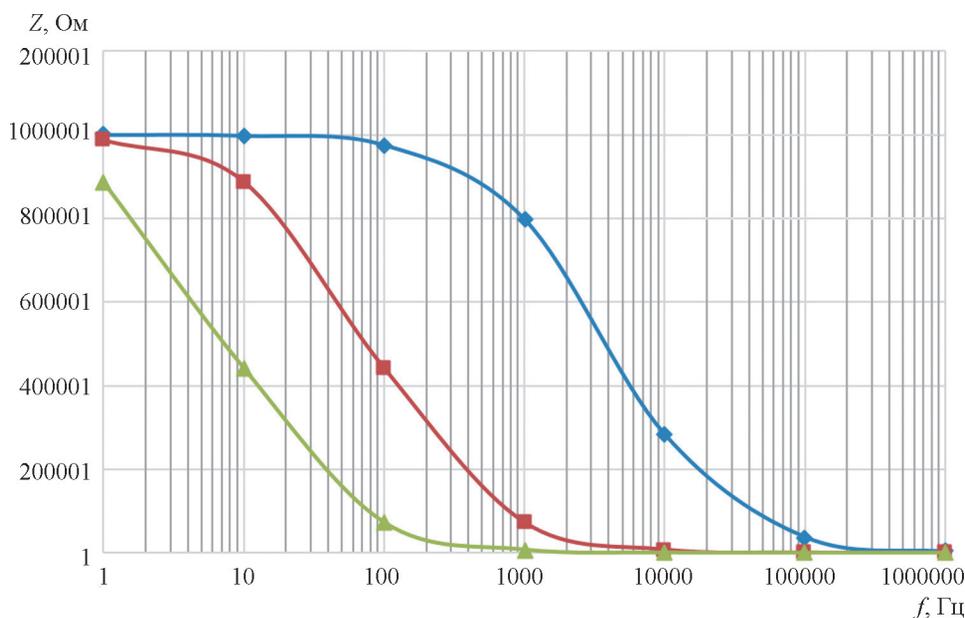


Рис. 13. Сравнение сопротивлений подшипников с керамическим покрытием и гибридного подшипника:
 ◆ — гибридный 20 °C (40 пФ); ■ — изолированный 20 °C (2 нФ); ▲ — изолированный 20 °C (20 нФ)

Для гибридных подшипников параметры сопротивления на порядок выше и, ввиду керамических тел качения, дуга не образовывается (рис. 13).

Заключение

Исходя из скачков напряжения, типичных для преобразователя, выделяют четыре вида тока: токи от du/dt , EDM (дуговой разряд накопленных зарядов), круговые и роторные блуждающие токи. В литературных источниках [13] при значениях подшипникового тока менее $0,8 \text{ А/мм}^2$ классифицируют безопасный режим работы, а в [1] считают безопасной эксплуатацию при плотности тока ниже $0,3 \text{ А/мм}^2$ и ожидают возможные повреждения при значениях свыше $0,7 \text{ А/мм}^2$.

Анализ емкостных составляющих АТМ показывает, что существуют паразитные емкости между обмоткой и пакетом активной стали статора, между обмоткой и ротором и емкость между ротором и пакетом активной стали статора. Подшипники двигателя представляют собой емкость, характеризующуюся отсутствием галь-

ванического контакта компонентов качения ввиду изолирующей смазочной пленки на контактных поверхностях. Приведены методы расчета данных величин. Полученные результаты и анализ емкостных составляющих АТМ показывают, что величина тока в различных подшипниках зависит от размеров ТМ и конфигурации заземления.

Один из способов повышения надежности подшипниковых узлов АТМ — применение изолированных подшипников. Исходя из расчетов и исследований изолированных подшипников SKF, сопротивление подшипников сильно зависит от частоты и гармонического состава питающего напряжения, поэтому применение изолированных подшипников не решает проблемы токов EDM и, как следствие, электрической эрозии дорожек качения (образования рифлений) и выходов из строя. Для подтверждения результатов авторами проводятся эксплуатационные испытания ЭПС с гибридными подшипниками с кольцами из подшипниковой стали и телами качения из подшипникового нитрида кремния (Si_3N_4).

Литература

1. Mutze A. Bearing Currents in Inverter Fed AC-motors. Aachen: TU-Darmstadt, 2004.
2. Busse D., Erdman J.M., Kerkman R.J., Schlegel D., Skibinski G. The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings // IEEE Trans. Industry Appl. 1997. V. 33. No. 2. Pp. 567—576.
3. Wittek E., Kriese M., Tischmacher H., Gatterman S., Poll G. Capacitances and Lubricant Film Thicknesses of Motor Bearings Under Different Operating Conditions // Proc. XIX Intern. Conf. Electrical Machines. 2010. Pp. 1—6.

References

1. Mutze A. Bearing Currents in Inverter Fed AC-motors. Aachen: TU-Darmstadt, 2004.
2. Busse D., Erdman J.M., Kerkman R.J., Schlegel D., Skibinski G. The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings. IEEE Trans. Industry Appl. 1997;33; 2:567—576.
3. Wittek E., Kriese M., Tischmacher H., Gatterman S., Poll G. Capacitances and Lubricant Film Thicknesses of Motor Bearings Under Different Operating Conditions. Proc. XIX Intern. Conf. Electrical Machines. 2010: 1—6.

4. **Muetze A.** Calculation of Motor Capacitances for Prediction of the Voltage Across the Bearings in Machines of Inverter-Based Driven Systems // IEEE Trans Industry Appl. 2007. V. 43. No. 3. Pp. 665—672.

5. **Tischmacher H., Gattermann S.** Bearing Currents in Converter Operation // Proc. XIX Intern. Conf. Electrical Machines. 2010. Pp. 784—791.

6. **Bruser P.** Untersuchungen Über die Elastohydrodynamische Schmierfilmdicke bei Elliptischen Hertzschen Kontaktflächen. Braunschweig, 1972.

7. **Baly H.** Rebung Fettgeschmierter Walzlager. Hannover, 2005.

8. **Magdun O.N.** Calculation of High-frequency Current Distributions in Inverter-fed Electrical Machines. Darmstad, 2012.

9. **Jablonka K., Glovnea R., Bongaerts J.** Evaluation of EHD Films by Electrical Capacitance // J. Physics D: Appl. Phys. 2012. V. 45. No. 38. P. 385301.

10. **Hamrock B.J., Dowson D.** Ball Bearing Lubrication. The Elastohydrodynamics of Elliptical Contacts. N.-Y.: Wiley&Sons, 1981.

11. **Hausberg V.** Elektrische Lagerbeanspruchung Umrichter gespeister Induktionsmaschinen. Hannover, 2002.

12. **Wiedemann E., Kellenberger W.** Konstruktion Elektrischer Maschinen. Berlin: Heidelberg, 1967.

13. **Busse D., Erdman J., Kerkman R.J., Schlegel D., Skibinski G.** Bearing Currents and Their Relationship to PWM Drives // IEEE Trans. Power Electronics. 1997. V. 12. No. 2. Pp. 243—252.

4. **Muetze A.** Calculation of Motor Capacitances for Prediction of the Voltage Across the Bearings in Machines of Inverter-Based Driven Systems. IEEE Trans Industry Appl. 2007;43; 3:665—672.

5. **Tischmacher H., Gattermann S.** Bearing Currents in Converter Operation. Proc. XIX Intern. Conf. Electrical Machines. 2010:784—791.

6. **Bruser P.** Untersuchungen Über die Elastohydrodynamische Schmierfilmdicke bei Elliptischen Hertzschen Kontaktflächen. Braunschweig, 1972.

7. **Baly H.** Rebung Fettgeschmierter Walzlager. Hannover, 2005.

8. **Magdun O.N.** Calculation of High-frequency Current Distributions in Inverter-fed Electrical Machines. Darmstad, 2012.

9. **Jablonka K., Glovnea R., Bongaerts J.** Evaluation of EHD Films by Electrical Capacitance. J. Physics D: Appl. Phys. 2012;45;38:385301.

10. **Hamrock B.J., Dowson D.** Ball Bearing Lubrication. The Elastohydrodynamics of Elliptical Contacts. N.-Y.: Wiley&Sons, 1981.

11. **Hausberg V.** Elektrische Lagerbeanspruchung Umrichter gespeister Induktionsmaschinen. Hannover, 2002.

12. **Wiedemann E., Kellenberger W.** Konstruktion Elektrischer Maschinen. Berlin: Heidelberg, 1967.

13. **Busse D., Erdman J., Kerkman R.J., Schlegel D., Skibinski G.** Bearing Currents and Their Relationship to PWM Drives. IEEE Trans. Power Electronics. 1997;12;2: 243—252.

Сведения об авторах:

Тулупов Виктор Дмитриевич — доктор технических наук, профессор кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ»

Слепцов Михаил Александрович — кандидат технических наук, профессор кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ»

Бриедис Александр Айнарлович — магистр по направлению «Электроэнергетика и электротехника», соискатель, ассистент кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ», e-mail: aleksandrs_briedis@mail.ru

Information about authors:

Tulupov Viktor D. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electrical Engineering Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI

Sleptsov Mikhail A. — Ph.D. (Techn.), Professor of Electrical Engineering Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI

Briedis Aleksandrs A. — Master's degree in «Electric Power Engineering and Electrical Engineering», Applicant, Assistant of Electrical Engineering Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI, e-mail: aleksandrs_briedis@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 27.10.2020

The article received to the editor: 27.10.2020