

УДК 621.313.333

Расчет паразитных емкостей асинхронного тягового электродвигателя, управляемого преобразователем частоты

А. В. Карманов

ООО «Уральские локомотивы», региональный центр, Россия, 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, участок ж/д Река Славянка — ЛЭП

Для цитирования: Карманов А. В. Расчет паразитных емкостей асинхронного тягового электродвигателя, управляемого преобразователем частоты // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 277–287. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-277-287

Аннотация

Цель: теоретический расчет паразитных емкостей асинхронного электродвигателя, управляемого преобразователем частоты, для создания имитационной модели. **Методы:** применение законов электротехники для расчета емкости плоского и цилиндрического конденсаторов и конструктивных характеристик асинхронного электродвигателя к расчету идеальных эквивалентов паразитных емкостей асинхронного электродвигателя. **Результаты:** предложена эквивалентная емкостная схема асинхронного электродвигателя, выполнены выделение паразитных емкостей асинхронного электродвигателя, замена их на идеальные эквиваленты. Предложены методы расчета идеальных эквивалентов паразитных емкостей тягового асинхронного электродвигателя, а также упрощенный метод оценки емкости шарикового радиального подшипника на основе оценки контактной площади зоны Герца. Выполнено сравнение данных, полученных теоретическим путем, с данными, полученными в результате проведенных измерений, и данными, приведенными в различных источниках. Предложенные методы отличаются простотой расчетов и имеют удовлетворительную точность. **Практическая значимость:** полученные в результате теоретического расчета данные используются в эквивалентной схеме асинхронного электродвигателя при создании модели тягового привода в среде имитационного моделирования Simulink для оценки величины приложенного к подшипнику напряжения и протекающего через него тока, определения потенциального пути протекания высокочастотного тока через подшипники тягового асинхронного электродвигателя с целью разработки дальнейших мер по снижению их влияния и повышению надежности подшипникового узла тягового асинхронного электродвигателя.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, синфазное напряжение, эквивалентная схема, паразитная емкость, подшипник, подшипниковый ток

Введение

Тяговый электродвигатель электропоезда является трехфазным асинхронным электродвигателем, который питается от инвертора с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), конструктивно состоящего из шести ключевых элементов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Каждый полумост, состоящий из двух IGBT,

формирует на выходе напряжение заданной частоты и амплитуды. Три полумоста позволяют создать трехфазную систему переменного напряжения для питания тягового электродвигателя. Действующее значение выходного напряжения регулируется посредством изменения ширины импульса выходного напряжения. Длительность импульсов выбирается таким образом, чтобы обеспечить форму тока

нагрузки, наиболее приближенной к синусоидальной, и обеспечить минимальные потери в инверторе напряжения.

Основные гармоники хоть и являются симметричными и сбалансированными, но при широтно-импульсной модуляции невозможно сделать сумму трех напряжений, в каждый момент времени равной нулю [1]. В таком случае напряжение в нейтральной точке «звезды» не равно нулю. Согласно [2], это напряжение — напряжение источника синфазной помехи (U_{CM} — *common mode voltage*). Синфазное напряжение U_{CM} характеризуется высокими скоростями нарастания dU/dt и равно среднему арифметическому напряжению трех фаз к земле [3]:

$$U_{CM} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}, \quad (1)$$

где U_A , U_B , U_C — фазные напряжения.

Приложенное на клеммах двигателя высокочастотное синфазное напряжение вследствие емкостных связей между компонентами асинхронного электродвигателя вызывает протекание синфазного тока.

Синфазный ток поступает в двигатель от инвертора и в наилучшем варианте через систему защитного заземления возвращается обратно на инвертор. Но часть синфазного тока протекает через подшипники электродвигателя, что приводит к их преждевременному отказу.

Эквивалентная емкостная схема асинхронного электродвигателя

Для упрощения понимания природы подшипниковых токов и дальнейшего имитационного моделирования тяговый электродвигатель можно представить в виде эквивалентной схемы [4] (рис. 1), в которой все распределенные паразитные емкости заменены на их идеальные эквиваленты.

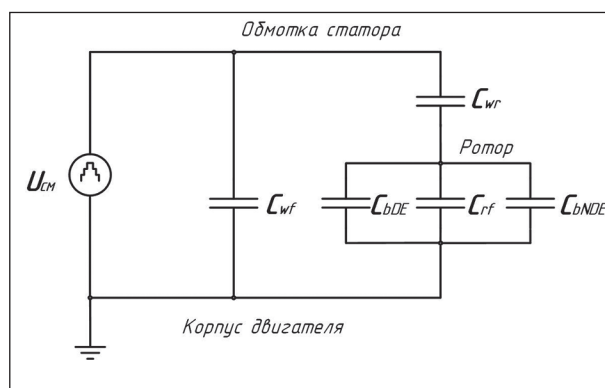


Рис. 1. Эквивалентная емкостная схема

асинхронного электродвигателя, где

C_{wf} (*winding-frame capacitor*) — емкость, образованная статорной обмоткой

и сердечником статора;

C_{wr} (*winding-rotor capacitor*) — емкость, образованная статорной обмоткой и ротором;

C_{rf} (*rotor frame capacitor*) — емкость, образованная ротором и сердечником статора;

C_{bDE} — емкость, образованная подшипником с приводной стороны (*drive end*);

C_{bNDE} — емкость, образованная подшипником с не приводной стороны (*none-drive end*)

Расчет паразитных емкостей асинхронного электродвигателя

Паразитные емкости асинхронного электродвигателя показаны на рис. 2.

Емкость, образованная статорной обмоткой и сердечником статора C_{wf} (*winding-frame capacitor*), для упрощения может быть представлена в виде n_s плоских конденсаторов [5] и рассчитана:

$$C_{wf} = n_s \frac{\epsilon_0 \epsilon S_s}{d_{iso}}, \quad (2)$$

где n_s — количество пазов сердечника статора;

ϵ_0 — электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м;

ϵ — диэлектрическая проницаемость изоляции статорной обмотки;

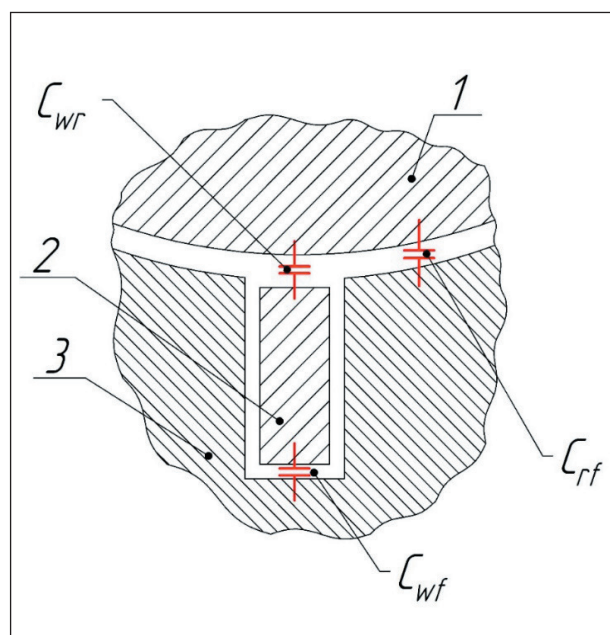


Рис. 2. Паразитные емкости асинхронного электродвигателя: 1 — ротор; 2 — обмотка статора; 3 — сердечник статора (пакет активной стали)

S_s — общая площадь поверхности паза сердечника статора, м^2 ;

d_{iso} — толщина слоя изоляции катушки статорной обмотки, м.

При применении паза прямоугольной формы его площадь вычисляется:

$$S_s = (2h + b)l, \quad (3)$$

где b — ширина паза, м;

h — глубина паза, м;

l — длина паза, м.

Емкость, образованная ротором и сердечником статора C_{rf} , зависит от геометрических параметров воздушного зазора. Эту емкость можно представить в виде цилиндрического конденсатора [6], емкость которого может быть рассчитана:

$$C_{rf} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{d_s}{d_r}}, \quad (4)$$

где l — длина статорного пакета, м;

d_r — диаметр ротора, м;

d_s — диаметр расточки статора, м.

Но так как воздушный промежуток δ много меньше, чем наружный диаметр ротора [7], натуральный логарифм отношения диаметра расточки статора к диаметру ротора может быть примерно определен:

$$\ln \frac{d_s}{d_r} \approx \frac{2\delta}{d_r}. \quad (5)$$

После линеаризации и введения коэффициента Картера k_c [8] получаем приближенное уравнение:

$$C_{rf} = \epsilon_0 l \frac{\pi d_r}{k_c \delta}, \quad (6)$$

где δ — ширина воздушного зазора, м.

Коэффициент Картера определяется отношением максимальной магнитной индукции в зазоре к средней и рассчитывается на основе геометрии зубцовой зоны [9]:

$$k_c = \frac{B_{\delta max}}{B_{\delta cp}} = \frac{\tau_n}{\tau_n - \gamma b_s}, \quad (7)$$

где τ_n — распределение пазов статора, $\tau_n = \frac{\pi d_s}{n_s}$;

γ — вспомогательный коэффициент, $\gamma = \frac{\frac{b_s}{\delta}}{\frac{b_s}{\delta} + 5}$;

b_s — ширина зубца сердечника статора, м.

Емкость между статорной обмоткой и ротором C_{wr} образуется вследствие взаимодействия обмоток статора в пазах и поверхностью ротора. Величина емкости C_{wr} относительно мала в сравнении с другими паразитными емкостями электродвигателя из-за относительно большого расстояния и небольшой площади между обмоткой статора и ротором. Моделирование емкости C_{wr} осуществляется в виде n_s плоских конденсаторов, каждый из которых состоит из последовательного соединения емкости C_{wr0} , образованной воздушным промежутком

и верхней границей пазового клина, и емкости C_{wr1} , образованной пазовым клином и проводником статорной обмотки [10]. Емкости рассчитываются:

$$C_{wr0} = n_s \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_a b_0 l}{h_0 + \delta}, \quad (8)$$

где ε_a — диэлектрическая проницаемость воздуха;

b_0 — ширина паза, м;

h_0 — высота шлица паза, м.

$$C_{wr1} = n_s \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{iso} b_0 l}{h_{iso}}, \quad (9)$$

где ε_{iso} — диэлектрическая проницаемость пазового клина;

h_{iso} — толщина пазового клина и изоляции обмотки, м.

Общая емкость двух последовательно соединенных конденсаторов вычисляется:

$$C_{wr} = \frac{1}{\frac{1}{C_{wr0}} + \frac{1}{C_{wr1}}}. \quad (10)$$

При вращении подшипника на скорости, достаточной для образования электрической изолирующей пленки смазочного материала, и если приложенное напряжение не превышает пороговое напряжение пробоя, то подшипник можно представить в виде конденсатора. Расчет его емкости вызывает значительные затруднения вследствие сложности геометрической структуры подшипника. Учитывая это, используется упрощенный метод, в котором для расчета применяется минимальная толщина пленки смазочного материала h_0 и контактная площадь области Герца A_H , которая определяется пластической деформацией шариков в подшипниках качения под воздействием механического давления в реальных условиях эксплуатации. На основании [11] площадь между телом и поверхностью качения условно

можно разделить на три зоны: зону входа, контактную зону Герца и зону выхода. Каждую из этих зон можно представить в виде определенной емкости, что показано на рис. 3. Общая емкость тела качения в контактной зоне состоит из трех параллельных емкостей [12] и равна:

$$C_{b1} = C_E + C_H + C_O, \quad (11)$$

где C_E — емкость зоны входа;

C_H — емкость контактной зоны Герца;

C_O — емкость зоны выхода.

Так как емкости зоны входа и зоны выхода зависят от геометрических параметров подшипника, то, как указано в [13], для расчета вводится поправочный коэффициент k_0 . В [14] принято универсальное значение поправочного коэффициента $k_0 = 3,5$. И далее расчет емкости ведется как для плоского конденсатора с учетом этого коэффициента:

$$C_{b1} = k_0 C_H = k_0 \times \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_A A_H}{h_0}, \quad (12)$$

где A_H — контактная площадь зоны Герца, м²;

h_0 — толщина пленки смазочного материала, м.

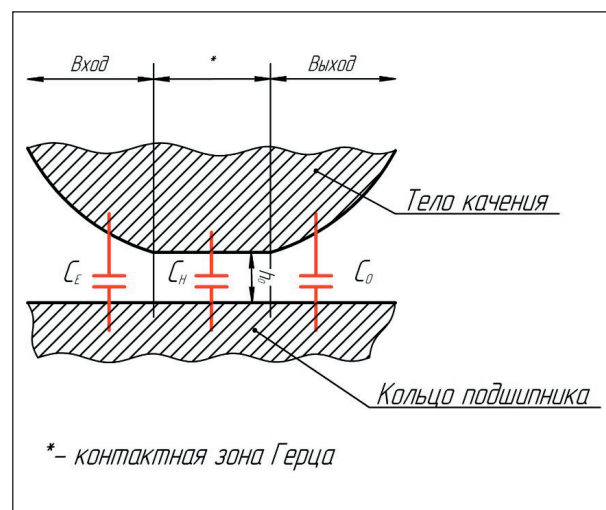


Рис. 3. Емкости в контактной зоне между телом и поверхностью качения подшипника

Согласно [15], контактная площадь зоны Герца вычисляется:

$$A_H = \pi ab, \quad (13)$$

где a и b — полуоси эллипса контакта.

Как сказано в [16], радиус пятна контакта шара с плоскостью определяется как:

$$a = 1,11 \left(\frac{FR}{E} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (14)$$

где R — радиус шарика, м;

E — модуль упругости стали, Па;

F — нагрузка на шарик, Н.

Для упрощенной оценки контактной площади зоны Герца допускаем, что $a \approx b$, тогда:

$$A_H \approx 3,8 \left(\frac{FR}{E} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (15)$$

При данной оценке площади зоны Герца применяется ряд допущений:

- $R_1 \approx R_2$, где R_1 — радиус шарика, R_2 — эквивалентный радиус кривизны дорожки качения в точке контакта;
- $E_1 = E_2$, где E_1 и E_2 — модули упругости материала шарика и кольца;
- $\nu_1 = \nu_2$, где ν_1 и ν_2 — коэффициенты Пуассона материалов шарика и кольца.

Внутренняя и внешняя поверхности качения и шарик образуют две последовательно соединенные емкости C_{b1} и C_{b2} [17] (рис. 4)

Для расчета предполагаем, что две емкости C_{b1} и C_{b2} одинаковы, поэтому, согласно определению емкости для последовательного соединения конденсаторов, емкость, образованная шариком:

$$\frac{1}{C_b} = \frac{1}{C_{b1}} + \frac{1}{C_{b2}}. \quad (16)$$

$$C_b = 0,5 C_{b1}. \quad (17)$$

Емкость подшипника в целом представляется параллельными емкостями, образованными шариками. Для расчета принимается, что

все эти емкости одинаковы. Поэтому, согласно определению емкости, при параллельном соединении конденсаторов:

$$C_B = \sum_{n=1}^{N_b} C_{b_n}. \quad (18)$$

Предложенный метод основывается на оценке контактной зоны Герца эллипсоидной, близкой к окружности формы. Поэтому он может быть применен для упрощенного расчета емкости только шарикового подшипника.

Пример расчета идеальных эквивалентов паразитных емкостей

В качестве примера для оценки адекватности метода теоретического расчета идеальных эквивалентов паразитных емкостей,

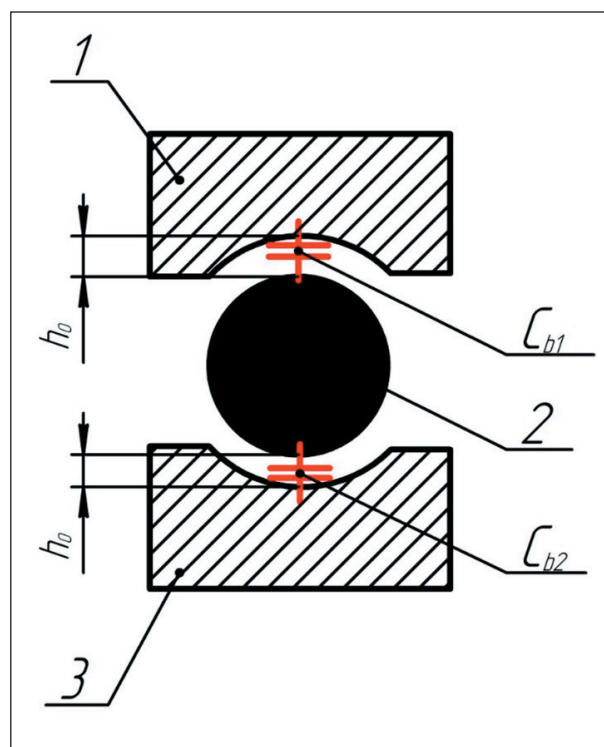


Рис. 4. Схематическое изображение двух конденсаторов, которые образованы шариком в подшипнике: 1, 3 — наружное и внутреннее кольца; 2 — шарик

основывающегося на законах электротехники и конструктивных характеристиках асинхронного электродвигателя, произведем расчет данных емкостей для тягового асинхронного электродвигателя 1TB2216-0GC03.

1. Расчет емкости, образованной обмоткой статора и сердечником статора.

Для расчета используются следующие исходные данные:

- количество пазов сердечника статора — 72;
- длина сердечника — 250 мм;
- ширина паза — 10,8 мм;
- глубина паза — 42 мм;
- изоляция обмотки — полиамидная, относительная диэлектрическая проницаемость находится в пределах 3,6...4,0, для расчетов принята $\epsilon = 3,8$;
- толщина изоляционного слоя — 1,5 мм.

$$C_{wf} = 72 \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,8 \cdot 0,0237}{0,0015} = 38,2575 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

2. Расчет емкости, образованной ротором и сердечником статора.

Для расчета используются следующие исходные данные:

- диаметр ротора — 346,4 мм;
- диаметр расточки статора — 350 мм;
- ширина воздушного зазора — 1,8 мм;
- ширина зубца сердечника статора — 6,5 мм.

$$\tau_n = \frac{\pi \cdot 350 \cdot 10^{-3}}{72} = 0,01527;$$

$$\gamma = \frac{\frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 10^{-3}}}{\frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 10^{-3}} + 5} = 0,4194;$$

$$k_c = \frac{0,0153}{0,0153 - 0,4194 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3}} = 1,22;$$

$$C_{rf} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,25 \cdot \frac{\pi \cdot 0,346}{1,22 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3}} = 1,10 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

3. Расчет емкости, образованной обмоткой статора и ротором.

Для расчета используются следующие исходные данные:

- ширина паза сердечника статора — 10,8 мм;
- высота шлица паза — 1 мм;
- материал пазового клина — стеклотекстолит, относительная диэлектрическая проницаемость находится в пределах 5,7...6,15, для расчетов принята $\epsilon_{iso} = 6,0$;
- толщина пазового клина и изоляции обмотки — 2,5 мм.

$$C_{wr0} = 72 \cdot \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,250}{1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8 \cdot 10^{-3}} = 0,614 \cdot 10^{-9} \text{ Ф;}$$

$$C_{wr1} = 72 \cdot \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,250}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 4,13 \cdot 10^{-9} \text{ Ф;}$$

$$C_{wr} = \frac{1}{\frac{1}{0,614 \cdot 10^{-9}} + \frac{1}{4,13 \cdot 10^{-9}}} = 0,535 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

4. Расчет емкости подшипника.

Для расчета используются следующие данные:

- диаметр шариков — 13,4940 мм;
- материал колец и шариков — хромистая сталь марки 100Cr6 (аналог в РФ — сталь ШХ15), модули упругости для хромистой стали марки ШХ15, $E = 210 \text{ ГПа}$;
- радиальная нагрузка — 4941 Н;
- минимальный радиальный люфт подшипника равен 0,085 мм, максимальный радиальный люфт равен 0,105 мм, поэтому толщину смазочной пленки для расчета примем $h_0 = 0,005 \text{ мм}$;

- смазка подшипника — Mobil Mobilith SHC 100, диэлектрическая проницаемость находится в пределах 2,4...2,8, для расчета принимается $\epsilon = 2,8$;

- токоизолирующий слой выполнен из оксида алюминия, диэлектрическая проницаемость находится в пределах 9...10, для расчета принимается $\epsilon = 10$.

$$A_H \approx 3,8 \cdot \left(\frac{4941 \cdot 6,747 \cdot 10^{-3}}{210 \cdot 10^9} \right)^{\frac{2}{3}} = 1,1141 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$C_{b1} = 3,5 \cdot \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 12,8 \cdot 1,1141 \cdot 10^{-6}}{0,005 \cdot 10^{-3}} = 88,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$C_b = 0,5 \cdot 88,3 \cdot 10^{-12} = 44,2 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$C_B = \sum_{n=1}^{14} 44,2 \cdot 10^{-12} = 618 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Заключение

Тяговый привод с использованием асинхронного тягового электродвигателя, управляемого тяговым преобразователем частоты, обладает бесспорными преимуществами перед тяговым приводом с коллекторными электродвигателями, но и имеет ряд недостатков. Одним из них является возникновение высокочастотных токов, протекающих через подшипники тягового электродвигателя и приводящих к их ускоренному износу.

Для разработки мер по снижению влияния подшипниковых токов необходимо предусмотреть потенциальные пути таких токов. Чтобы разработать имитационную модель для исследования подшипниковых токов, тяговый электродвигатель заменяется эквивалентной емкостной схемой. Все распределенные паразитные емкости заменяются идеальными эквивалентами. В ходе выполнения работы выделе-

ны паразитные емкости, предложены методы теоретического расчета их величин. При расчете емкости, образованной обмоткой статора и пакетом активной стали тягового электродвигателя 1TB2216-0GC03, получено значение $C_{wf} = 38,2575 \text{ нФ}$, при измерении данной емкости измерителем параметров RLC получено значение $C_{wf} = 35,670 \text{ нФ}$.

Измерения емкостей, образованных ротором и статорной обмоткой, а также ротором и сердечником статора, будут недостоверными из-за наличия параллельных емкостей, образованных подшипниками с приводной и неприводной стороны. Погрешность в эти измерения вносят подшипниковый щит с неприводной стороны, вентиляционная решетка с напрессованной полумуфтой со стороны привода, а также наличие лабиринтных колец подшипников. В [6] для электродвигателя мощностью 500 кВт приводятся данные $C_{rf} = 1,375 \text{ нФ}$ и $C_{wf} = 0,137 \text{ нФ}$. При теоретическом расчете получены $C_{rf} = 1,10 \text{ нФ}$ и $C_{wf} = 0,535 \text{ нФ}$. В [18] для однорядного радиального шарикового подшипника типа 6316 указана емкость $C_b = 159 \text{ пФ}$, в работе при расчете емкости подшипника типа 6016 получено значение емкости $C_b = 618 \text{ пФ}$.

Теоретический расчет емкости подшипника будет приближителен из-за погрешности при определении контактной площади зоны Герца, использования универсального значения поправочного коэффициента и вероятного определения толщины смазочной пленки. Но исходя из сравнений результатов, полученных в результате измерений, можно судить об адекватности метода теоретического расчета паразитных емкостей и использовании полученных значений при создании имитационной модели с целью дальнейшей разработки мер по снижению влияния высокочастотного тока на работу подшипникового узла тягового асинхронного электродвигателя.

Список источников

1. Singh H., Sudhoff S. D. A Common-Mode Shorting Network to Reduce Common-Mode Excitation of Three-Phase Two-Level Electric Drives // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. 2023. Vol. 10. Pp. 14–24. URL: https://www.academia.edu/103826562/A_Common_Mode_Shorting_Network_to_Reduce_Common_Mode_Excitation_of_Three_Phase_Two_Level_Electric_Drives (дата обращения: 12.12.2025).
2. ГОСТ Р 55136-2017/IEC/TS60034-25:2007. Машины электрические вращающиеся. Часть 25. Руководство по конструкции и характеристикам машин переменного тока, специально предназначенных для питания от преобразователей // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103686> (дата обращения: 12.12.2025).
3. An Impedance Source Multi-Level Three Phase Inverter with Common Mode Voltage Elimination and Dead Time Compensation / M. Mahmoudian [et al.] // Electronics. 2020. No. 9. Pp. 1639–1655. URL: https://www.researchgate.net/publication/344582701_An_Impedance_Source_Multi-Level_Three_Phase_Inverter_with_Common_Mode_Voltage_Elimination_and_Dead_Time_Compensation (дата обращения: 15.12.2025).
4. Adabi J., Zare F. Analysis, Calculation and Reduction of Shaft Voltage in Induction Generators // Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Power Quality, 15–17 April. 2009. Valencia. URL: <https://eprints.qut.edu.au/20191/1/20191.pdf> (дата обращения: 15.12.2025).
5. A Review of Modeling and Mitigation Techniques for Bearing Currents in Electrical Machines with Variable-Frequency Drives / W. Zhu [et al.] // IEEE Access. 2022. Vol. 10. Pp. 125279–125297. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9964144> (дата обращения: 20.12.2025).
6. Muetze A., Binder A. Calculation of Motor Capacitances for Prediction of the Voltage Across the Bearings in Machines of Inverter-Based Drive Systems // IEEE Transactions on Industry Applications, May/June 2007. Vol. 43, no.3. Pp. 665–672. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4215013> (дата обращения: 25.12.2025).
7. Normalization-Based Approach to Electric Motor BVR Related Capacitances Computation / J. Ahola [et al.] // 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). San Antonio. TX. USA. 2018. Pp. 2868–2874. URL: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159886/ahola_et_al_normalization-based_approach_final_draft.pdf (дата обращения: 25.12.2025).
8. Binder A., Muetze A. Scaling Effects of Inverter-Induced Bearing Currents in AC Machines. // IEEE Transactions on Industry Applications, May/June 2008. Vol. 44, no.3. Pp. 769–776. URL: https://www.researchgate.net/publication/3175055_Scaling_Effects_of_Inverter-Induced_Bearing_Currents_in_AC_Machines (дата обращения: 27.12.2025).
9. Тулюпов В.Д., Слепцов М.А., Бридис А.А. Методы повышения надежности работы подшипниковых узлов в тяговых асинхронных машинах // Вестник МЭИ. 2021. №2. С. 60–70. URL: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/695> (дата обращения: 04.01.2026).
10. Tawfiq K. B., Güleç M., Sergeant P. Bearing Current and Shaft Voltage in Electrical Machines: A Comprehensive Research Review // Machines. 2023. No. 11. 550 p. URL: https://www.academia.edu/106269225/Bearing_Current_and_Shaft_Voltage_in_Electrical_Machines_A_Comprehensive_Research_Review (дата обращения: 04.01.2026).
11. Modeling of Bearing Voltage in Electric Machines Based on Electromagnetic FEA and Measured Bearing Capacitance / P. Han [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications, Sept./Oct. 2021. Vol. 57, no. 5. Pp. 4765–4775. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9465698> (дата обращения: 05.01.2026).
12. Furtmann A., Gerhard P. Evaluation of Oil-Film Thickness Along the Path of Contact in a Gear Mesh by Capacitance Measurement // Tribology Online. 2016. No. 11. Pp. 189–194. URL: https://www.researchgate.net/publication/3175055_Scaling_Effects_of_Inverter-Induced_Bearing_Currents_in_AC_Machines

net/publication/301746461_Evaluation_of_Oil-Film_Thickness_Along_the_Path_of_Contact_in_a_Gear_Mesh_by_Capacitance_Measurement (дата обращения: 06.01.2026).

13. Becker-Dombrowsky F.M., Kirchner E. Electrical Impedance Based Condition Monitoring of Machine Elements — A Systematic Review // *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 10.

14. Electrical Bearing Damage, A Problem in the Nano- and Macro-Range / V. Schneider [et al.] // *Lubricants*. 2022. No.10. 194 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/362838744_Electrical_Bearing_Damage_A_Problem_in_the_Nano-and_Macro-Range (дата обращения: 10.01.2026).

15. The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings / D.F. Busse [et al.] // *IEEE Transactions on Industry Applications*, March/April 1997. Vol. 33, no. 2. Pp. 567–576. URL: https://www.academia.edu/85626258/The_effects_of_PWM_voltage_source_inverters_on_the_mechanical_performance_of_rolling_bearings (дата обращения: 11.01.2026).

16. Короткевич С.В., Холодилов О.В. Оценка толщины смазочного слоя в подшипниках качения электрорезистивным методом // *Электронная*

библиотека Белорусско-Российского университета. 2017. URL: <http://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/5056/382-388.pdf> (дата обращения: 11.01.2026).

17. Bearing Damage Analysis by Calculation of Capacitive Coupling Between Inner and Outer Races of a Ball Bearing / J. Adabi [et al.] // *13th International Power Electronics and Motion Control Conference*. Poznan, Poland, 2008. Pp. 903–907. URL: https://www.researchgate.net/publication/224331398_Bearing_Damage_Analysis_by_Calculation_of_Capacitive_Coupling_between_Inner_and_Outer_Races_of_a_Ball_Bearing (дата обращения: 11.01.2026).

18. Binder A., Magdun O., Gemeinder Y. Calculation of Parasitic High Frequency Currents in Inverter-Fed AC Machines. URL: https://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/rd/ew_vortraege/100205_binder_magdun_gemeinder.pdf (дата обращения: 12.01.2026).

Дата поступления: 06.02.2026

Решение о публикации: 14.04.2026

Контактная информация:

КАРМАНОВ Александр Валерьевич — ведущий инженер, магистрант; saxa.karmanov@yandex.ru

Calculation of Parasitic Capacitances of an Asynchronous Traction Motor with Variably-Frequency Drives

A. V. Karmanov

LLC “Ural Locomotives”, Regional Center, railway section River Slavyanka — LEP, Metallostroj, Saint Petersburg, 196641, Russia

For citation: *Karmanov A. V.* Calculation of Parasitic Capacitances of an Asynchronous Traction Motor with Variably-Frequency Drives // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 277–287. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-277-287 (In Russian)

Abstract

Purpose: theoretical calculation of parasitic capacitances in an asynchronous motor with variably-frequency drives in order to create a simulation model. **Methods:** application of electrical engineering principles to calculate the capacitance of planar and cylindrical capacitors and the structural characteristics of the asynchronous motor for computing the ideal equivalent of the motor's parasitic capacitances. **Results:** a parasitic-capacitance equivalent circuit of the induction motor is proposed, parasitic capacitances of the

asynchronous motor are identified and replaced with ideal equivalent, methods for calculating the ideal equivalents of the parasitic capacitances of the traction asynchronous motor are proposed, and a simplified method for estimating the capacitance of a ball radial bearing based on the Hertzian contact area is presented. Comparisons are performed between data obtained theoretically, data obtained from measurement, and data from various sources. The proposed methods are simple to compute and provide satisfactory accuracy. **Practical significance:** theoretical calculation results are used in the motor's equivalent circuit when building a traction drive model in the Simulink simulation environment to assess the magnitude of the voltage applied to the bearing and the current flowing through it, to determine the potential path of high-frequency current through the bearings of a traction asynchronous motor, with the aim of developing further measures to reduce their influence and improve the reliability of the traction asynchronous motor bearing assembly.

Keywords: asynchronous motor, common-mode voltage, equivalent circuit, parasitic capacitance, bearing, bearing current

References

1. Singh H., Sudhoff S. D. A Common-Mode Shorting Network to Reduce Common-Mode Excitation of Three-Phase Two-Level Electric Drives, *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 2023, vol. 10, pp. 14–24. URL: https://www.academia.edu/103826562/A_Common_Mode_Shorting_Network_to_Reduce_Common_Mode_Excitation_of_Three_Phase_Two_Level_Electric_Drives (accessed: December 12, 2026).
2. GOST R 55136-2017/IEC/TS60034-25:2007. Mashiny elektricheskoy vrashchayushchiesya. CHast' 25. Rukovodstvo po konstrukcii i harakteristikam mashin peremennogo toka, special'no prednaznachennyh dlya pitaniya ot preobrazovatelej [Rotating Electric Machines. Part 25. Guide to the Design and Characteristics of AC Machines Specifically Designed for Power Supply from Converters], Electronic Fund of Legal and Regulatory Documents. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103686> (In Russian)
3. Mahmoudian M., et al. An Impedance Source Multi-Level Three Phase Inverter with Common Mode Voltage Elimination and Dead Time Compensation. *Electronics*, 2020, no. 9, pp. 1639–1655. URL: https://www.researchgate.net/publication/344582701_An_Impedance_Source_Multi-Level_Three_Phase_Inverter_with_Common_Mode_Voltage_Elimination_and_Dead_Time_Compensation (accessed: December 15, 2025).
4. Adabi J., Zare F. Analysis, Calculation and Reduction of Shaft Voltage in Induction Generators, *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Power Quality*, Valencia, April 15–17, 2009. URL: <https://eprints.qut.edu.au/20191/1/20191.pdf>
5. Zhu W., et al. A Review of Modeling and Mitigation Techniques for Bearing Currents in Electrical Machines with Variable-Frequency Drives, *IEEE Access.*, 2022, vol. 10, pp. 125279–125297. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9964144> (accessed: December 20, 2025).
6. Muetze A., Binder A. Calculation of Motor Capacitances for Prediction of the Voltage Across the Bearings in Machines of Inverter-Based Drive Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, May–June 2007, vol. 43, no. 3, pp. 665–672. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4215013>
7. Ahola J., et al. Normalization-Based Approach to Electric Motor BVR Related Capacitances Computation, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2018, USA, San Antonio, pp. 2868–2874. URL: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159886/ahola_et_al_normalization-based_approach_final_draft.pdf (accessed: December 25, 2025).
8. Binder A., Muetze A. Scaling Effects of Inverter-Induced Bearing Currents in AC Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, May–June 2008, vol. 44, no. 3, pp. 769–776. URL: https://www.researchgate.net/publication/3175055_Scaling_Effects_of_Inverter-Induced_Bearing_Currents_in_AC_Machines (accessed: December 27, 2025).

9. Tulupov V. D., Sleptsov M. A., Briedis A. A. Metody povysheniya nadezhnosti raboty podshipnikov v tyagovyh asinhronnykh mashinah [Ways to Improve the Reliability of Bearings in Traction Induction Machines.], *Vestnik MEI [Bulletin of MPEI]*, 2021, no. 2, pp. 60–70. URL: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/695> (In Russian)
10. Tawfiq K. B., Güleç M., Sergeant P. Bearing Current and Shaft Voltage in Electrical Machines: A Comprehensive Research Review, *Machines*, 2023, no. 11, 550 p. URL: https://www.academia.edu/106269225/Bearing_Current_and_Shaft_Voltage_in_Electrical_Machines_A_Comprehensive_Research_Review (accessed: January 04, 2026).
11. Han P., et al. Modeling of Bearing Voltage in Electric Machines Based on Electromagnetic FEA and Measured Bearing Capacitance, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Sept.-Oct. 2021, vol. 57, no. 5, pp. 4765–4775. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9465698>
12. Furtmann A., Gerhard P. Evaluation of Oil-Film Thickness Along the Path of Contact in a Gear Mesh by Capacitance Measurement, *Tribology Online*, 2016, no. 11, pp. 189–194. URL: https://www.researchgate.net/publication/301746461_Evaluation_of_Oil-Film_Thickness_Along_the_Path_of_Contact_in_a_Gear_Mesh_by_Capacitance_Measurement (accessed: January 06, 2026).
13. Becker-Dombrowsky F.M, Kirchner E. Electrical Impedance Based Condition Monitoring of Machine Elements — Systematic Review, *Frontiers in Mechanical Engineering*, July 2024, vol. 10. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/mechanical-engineering/articles/10.3389/fmech.2024.1412137/full>
14. Schneider V., et al. Electrical Bearing Damage, A Problem in the Nano- and Macro-Range, *Lubricants*, 2022, no. 10, 194 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/362838744_Electrical_Bearing_Damage_A_Problem_in_the_Nano-_and_Macro-Range (accessed: January 10, 2026).
15. Busse D. F., et al. The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings, *IEEE Transactions on Industry Applications*, March -April 1997, vol. 33, no. 2, pp. 567–576. URL: https://www.academia.edu/85626258/The_effects_of_PWM_voltage_source_inverters_on_the_mechanical_performance_of_rolling_bearings (accessed: January 11, 2026).
16. Korotkevich S. V., Kholodilov O.V. Ocenka tolshchiny smazochного sloяa v podshipnikakh kacheniya elektrozestivnym metodom [Evaluation of the Thicknaess of a Lubricant Layer in Bearing Electroresestive Method], *Elektronnaya biblioteka Belorussko-Rossijskogo universiteta [DSpace Home]*, 2017, pp. 382–388. URL: <http://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/12121212/5056/382-388.pdf> (accessed: January 11, 2026). (In Russian).
17. Adabi J., et al. Bearing Damage Analysis by Calculation of Capacitive Coupling Between Inner and Outer Races of a Ball Bearing, *13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Poznan, Poland, 2008, pp. 903–907. URL: https://www.researchgate.net/publication/224331398_Bearing_Damage_Analysis_by_Calculation_of_Capacitive_Coupling_between_Inner_and_Outer_Races_of_a_Ball_Bearing (accessed: January 11, 2026).
18. Binder A., Magdun O., Gemeinder Y. Calculation of Parasitic High Frequency Currents in Inverter-Fed AC Machines. URL: https://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/rd/ew_vortraege/100205_binder_magdun_gemeinder.pdf (accessed: January 12, 2026).

Received: February 06, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Alexander V. KARMANOV — Lead Engineer,
Magister's Student;
saxa.karmanov@yandex.ru