

# Оценка пульсаций магнитного поля и момента асинхронного двигателя с фазным ротором при ортогональном управлении\*

Безбородов Е.С.

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева»

г. Саранск, Российская Федерация

[egor.bez-off@yandex.ru](mailto:egor.bez-off@yandex.ru)

**Аннотация.** В работе выполнено исследование связи пространственной неравномерности магнитного поля в воздушном зазоре и пульсаций электромагнитного момента асинхронного двигателя с фазным ротором при ортогональном управлении с постоянным потокосцеплением. Расчеты проведены на основе двумерной нестационарной модели метода конечных элементов, реализованной в COMSOL Multiphysics, с учетом зубчато-пазовой геометрии статора и ротора и нелинейных магнитных свойств электротехнической стали. Обмотки статора и ротора заданы гомогенизированными многовитковыми катушками, момент вычислялся энергетическим методом Арккио. Для количественной оценки введены коэффициенты пульсаций радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре и электромагнитного момента. Получены зависимости коэффициентов пульсаций от относительного электромагнитного момента при различных сочетаниях частот токов статора и ротора; выявлен немонотонный характер изменения пульсаций при росте нагрузки. Показано, что номинальный режим работы по условиям нагрева и энергетических показателей не соответствует минимальному уровню пульсаций поля и момента, что подтверждает необходимость учета зубцовых гармоник и насыщения магнитопровода при анализе динамических показателей электропривода и при сравнении законов управления.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель с фазным ротором, ортогональное управление, метод конечных элементов, магнитная индукция в воздушном зазоре, пульсации электромагнитного момента, зубцовые гармоник, COMSOL Multiphysics.

## ВВЕДЕНИЕ

Асинхронные двигатели с фазным ротором (АДФР) широко применяются в регулируемых электроприводах средней и большой мощности, где требуется гибкое управление электромагнитным моментом и потокосцеплением в широком диапазоне нагрузок и скоростей вращения [1]. В таких приводах все более широкое распространение получают системы векторного управления. В частности, ортогональное управление, которое способно обеспечить высокую энергоэффективность электропривода [2]. Такое управление основано на раздельном регулировании составляющих тока по продольной и поперечной осям, что позволяет приближать электромагнитные процессы к условиям идеальной синусоидальности.

Классические математические модели асинхронных машин, применяемые при разработке систем ортогонального управления, базируются на усредненном представлении

магнитного поля и предполагают пространственно равномерное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре [3]. Однако реальная конструкция асинхронного двигателя характеризуется выраженной зубцовой структурой статора и ротора, конечной магнитной проницаемостью стали и локальными зонами насыщения, что приводит к появлению пространственных гармоник магнитного поля в зазоре [4, 5].

Как показано в фундаментальных работах по теории электрических машин, зубцовые гармоники магнитного поля являются одной из основных причин пульсаций электромагнитного момента, дополнительных потерь и повышенного уровня вибраций и шума [5].

В проектировании электрических машин вопросы пульсаций поля в зазоре и момента рассматриваются как конструктивно-обусловленные; для их снижения применяют скос пазов/зубцов, оптимизацию формы паза и зубцового наконечника, подбор сочетания чисел пазов статора и ротора, распределенные и укороченные обмотки, а также технологические меры повышения магнитной однородности [6, 7]. Наиболее распространенной конструктивной мерой является скос пазов, позволяющий существенно уменьшать амплитуду пульсаций электромагнитного момента

В традиционных аналитических моделях влияние зубцовой структуры и локального насыщения либо учитывается приближенно с помощью эмпирических коэффициентов, либо полностью исключается, что ограничивает точность анализа при исследовании динамических и энергетических характеристик электропривода [3, 8, 9]. В связи с этим для детального исследования электромагнитных процессов все более широко применяется метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий учитывать реальную геометрию машины, нелинейные магнитные свойства материалов и пространственно-временные гармоники поля [9, 10].

Несмотря на значительное число работ, посвященных МКЭ-моделированию асинхронных двигателей, вопросы взаимосвязи пульсаций магнитной индукции в воздушном зазоре и пульсаций электромагнитного момента при ортогональном управлении остаются недостаточными исследованными, особенно для АДФР серийного исполнения [11, 12]. В частности, в литературе анализ изменения уровня пульсаций в зависимости от нагрузки и насыщения магнитной цепи при сохранении постоянного потокосцепления освещен ограниченно [13].

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

Ортогональное управление при условии поддержания потокосцепления по продольной оси на уровне  $\psi_d = \text{const}$  фактически задает магнитное состояние машины, а регулирование момента осуществляется изменением моментной составляющей тока. В идеализированных dq-моделях это приводит к близкому к линейному закону формирования момента и к ослаблению паразитных составляющих, поскольку предполагается пространственная равномерность поля в зазоре и отсутствие зубцовой модуляции. Однако в АДФР при питании как статора, так и ротора, режим формируется не только величиной токов, но и сочетанием частот токов статора  $f_1$  и ротора  $f_2$ , которые определяют взаимное скольжение полей, а также направление вращения результирующего поля в роторной цепи (знак  $f_2$ ). Это создает предпосылки к изменению спектра пространственно-временных гармоник в зазоре и, как следствие, к изменению уровня пульсаций электромагнитного момента при сохранении одинакового уровня возбуждения по  $\psi_d$ . С практической точки зрения это означает, что оптимизация режима по энергетическим показателям (например, по КПД и коэффициенту мощности) не гарантирует минимизации пульсаций момента и поля в зазоре, а при сравнении законов управления требуется учитывать конструктивно-обусловленные эффекты (зубцовая зона, локальное насыщение). Поэтому в работе анализ пульсаций выполнен не для одной рабочей точки, а на сетке нагрузок, что позволяет выявить характер изменения пульсаций при переходе от режимов, близких к холостому ходу, к номинальным режимам и интерпретировать причины немонотонности. Такая постановка необходима для последующего введения ограничений по пульсациям в критерии оценки качества режимов ортогонального управления.

На основе МКЭ-модели АДФР 4АК160М4УЗ исследуются пульсации радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре и электромагнитного момента при ортогональном управлении в диапазоне нагрузок от близких к холостому ходу до номинальных режимов. Полученные результаты позволяют уточнить представления о влиянии пространственной неравномерности магнитного поля на энергетические и динамические показатели электропривода и обосновать необходимость учета этих эффектов при анализе и проектировании систем управления и электроприводов.

#### ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПУЛЬСАЦИЙ

Исследование электромагнитных процессов выполнено на основе двумерной модели АДФР 4АК160М4УЗ, реализованной в программном комплексе COMSOL Multiphysics с использованием модуля AC/DC. В модели учитывалось реальное поперечное сечение машины, включающее геометрию статора и ротора с зубчато-пазовой структурой, воздушный зазор и области размещения обмоток (рис. 1). Длина активной части машины принималась равной номинальной длине сердечников и учитывалась при расчете интегральных электромагнитных величин. Геометрические и намоточные данные приняты по паспортным данным и расчетной методике. Базовая верификация по интегральным величинам (момент, токи, напряжения) ранее показала согласие с экспериментом на уровне единиц процентов, что использовано как основание для последующего анализа пульсаций [14].

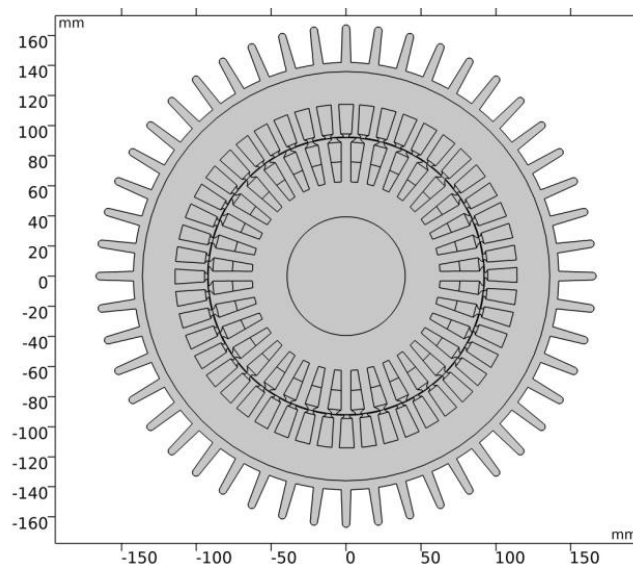


Рис. 1. Сечение двигателя 4АК160М4УЗ

Электромагнитное поле рассчитывалось в нестационарной постановке с учетом нелинейных магнитных свойств электротехнической стали. Обмотки статора и ротора моделировались с использованием гомогенизированных многовитковых катушек (Homogenized Multiturn Coil), что позволило корректно учитывать распределение токов в пазах при несоответствии геометрии доменов реальной форме проводников. Токи в фазах статора и ротора задавались в виде синусоидальных функций времени с заданными частотами и фазовыми сдвигами, соответствующими режиму ортогонального управления с постоянным потокосцеплением [15].

В рамках ортогонального управления режимы возбуждения формировались при условии поддержания потокосцепления по продольной оси на заданном уровне ( $\psi_d = \text{const}$ ), при этом моментная составляющая тока изменялась пропорционально требуемому электромагнитному моменту. В расчетной модели это реализовано заданием трехфазных синусоидальных токов статора и ротора с согласованными амплитудами и фазовыми сдвигами, соответствующими выбранной рабочей точке по моменту и скорости. Тем самым для каждого режима моделирования обеспечивалось сохранение требуемого уровня магнитного состояния машины при изменении нагрузки, что позволяет сопоставлять коэффициенты пульсаций при одинаковом уровне возбуждения магнитной цепи.

Расчет электромагнитного момента выполнялся на основе энергетического метода (метод Арккио), реализованного в COMSOL, что обеспечивает корректное определение момента в условиях сложного пространственного распределения магнитного поля и зубчатой структуры зазора [16, 17]. Такой подход широко применяется в МКЭ-анализе электрических машин и позволяет учитывать вклад пространственных гармоник магнитного поля в формировании момента.

Расчет выполнялся в двумерной постановке по поперечному сечению машины, что соответствует принятому в инженерной практике квазитрехмерному подходу, когда длина активной части вводится как масштабный параметр

для интегральных величин. Учет вращения ротора реализован средствами интерфейса для вращающихся электрических машин (вращающийся домен/скользящий слой в области зазора), что позволяет корректно воспроизводить изменение взаимного положения зубцов статора и ротора во времени и формирование зубцовых гармоник. Внешняя граница расчетной области задавалась с условием магнитной изоляции, обеспечивающим корректное замыкание магнитного потока внутри модели при достаточном удалении границы от магнитопровода. Нелинейные магнитные свойства стали учитывались по заданной кривой намагничивания, что принципиально важно для анализа режима насыщения в области вершин зубцов при росте нагрузки.

Для исключения влияния численных артефактов на оценку коэффициентов пульсаций выполнялся контроль параметров сетки и временного шага: сетка сгущалась в воздушном зазоре и в зубцовой зоне, где градиенты поля максимальны, а временной шаг выбирался из условия корректного разрешения основной частоты и высокочастотных составляющих момента.

Для анализа пространственной неравномерности магнитного поля в воздушном зазоре рассматривалась радиальная составляющая магнитной индукции  $B_r$ , определяемая по средней части окружности с радиусом 92,5 мм, расположенной внутри воздушного зазора по всей его длине. Радиальная составляющая магнитной индукции непосредственно связана с основным магнитным потоком машины и наиболее чувствительна к зубцовой модуляции магнитного поля, что делает ее информативной величиной для анализа пульсаций [4, 5]. Коэффициент пульсаций магнитной индукции в воздушном зазоре определяется по выражению:

$$k_B = \frac{B_{r,max} - B_{r,min}}{2|B_r|}, \quad (1)$$

где  $B_{r,max}$  и  $B_{r,min}$  – соответственно максимальное и минимальное значения радиальной составляющей магнитной индукции вдоль окружности воздушного зазора в фиксированный момент времени,  $|B_r|$  – среднее по окружности значение модуля радиальной составляющей магнитной индукции.

Такой способ определения коэффициента пульсаций позволяет учитывать полное пространственное распределение магнитного поля, включая влияние полюсной структуры и зубцовой зоны, и широко применяется при анализе неравномерности магнитного поля в электрических машинах [13].

Коэффициент пульсаций электромагнитного момента определяется аналогичным образом:

$$k_M = \frac{M_{max} - M_{min}}{2\bar{M}}, \quad (2)$$

где  $M_{max}$ ,  $M_{min}$  и  $\bar{M}$  – соответственно максимальное, минимальное и среднее значение электромагнитного момента за рассматриваемый интервал времени. Для исключения влияния переходных процессов моделирование проводилось в установившемся режиме, при этом анализ пульсаций выполнялся на временном интервале, соответствующем целому циклу периодов тока ротора. Установившейся режим фиксировался на интервале, равном периоду тока ротора, после завершения переходного процесса по моменту.

Расчеты проводились для нескольких режимов работы, отличающихся частотами тока статора и ротора и уровнем электромагнитного момента, в том числе для режимов, близких к холостому ходу, и номинального режима работы. Скорость вращения вала принята как номинальная и половина номинальной. Такой подход позволил проследить изменение уровня пульсаций магнитной индукции и электромагнитного момента в зависимости от нагрузки и степени насыщения магнитной цепи машины [18].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате моделирования были получены временные зависимости электромагнитного момента и пространственные распределения магнитной индукции в воздушном зазоре АДФР для различных уровней нагрузок и частот токов статора и ротора. Анализ проводился при ортогональном управлении с постоянным потокоцеплением.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов пульсаций магнитной индукции  $k_B$  и электромагнитного момента  $k_M$  от относительного электромагнитного момента для режимов с частотами  $f_1=45$  Гц,  $f_2=-5$  Гц и  $f_1=30$  Гц,  $f_2=5$  Гц. Знак частоты тока ротора  $f_2$  трактуется как изменение поля в роторной цепи, задаваемое сменой чередования фаз: при  $f_2 > 0$  и  $f_2 < 0$  направление вращающегося поля в роторе различно, что соответствует принятой в эксперименте и верификационных расчетах трактовке.

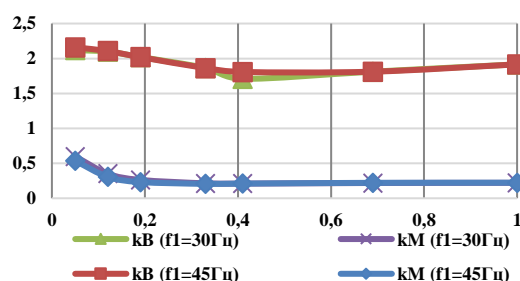


Рис. 2. Коэффициенты пульсаций электромагнитного момента и магнитной индукции при заданных частотах фазных токов

Во всем диапазоне исследуемых режимов наблюдается немонотонный характер изменения коэффициентов пульсаций: при переходе от режимов, близких к холостому ходу, к средним нагрузкам уровень пульсаций снижается, достигая минимума, после чего при дальнейшем увеличении нагрузки вновь возрастает.

Минимальные значения коэффициента пульсаций магнитной индукции достигаются при средних значениях электромагнитного момента и составляют порядка  $k_B \approx 1,9$ , тогда как в режимах малой нагрузки и вблизи номинального режима коэффициент пульсаций возрастает до значений 2,1–2,2. Аналогичный характер изменения наблюдается и для коэффициента пульсаций электромагнитного момента, который уменьшается от значений порядка  $k_M \approx 0,5$  при малых нагрузках до 0,2 в области средних и номинальных нагрузок.

На рис. 3 приведены характерные распределения радиальной составляющей магнитной индукции  $B_r$  по окружности воздушного зазора для режимов малой нагрузки и номинального электромагнитного момента. Видно, что при

малой нагрузке распределение магнитной индукции отличается выраженной пространственной неравномерностью, обусловленной зубцовой структурой магнитопровода. При увеличении нагрузки возрастает средний уровень магнитной индукции, однако локальные максимумы в области вершин зубцов сохраняются и усиливаются вследствие насыщения магнитопровода.

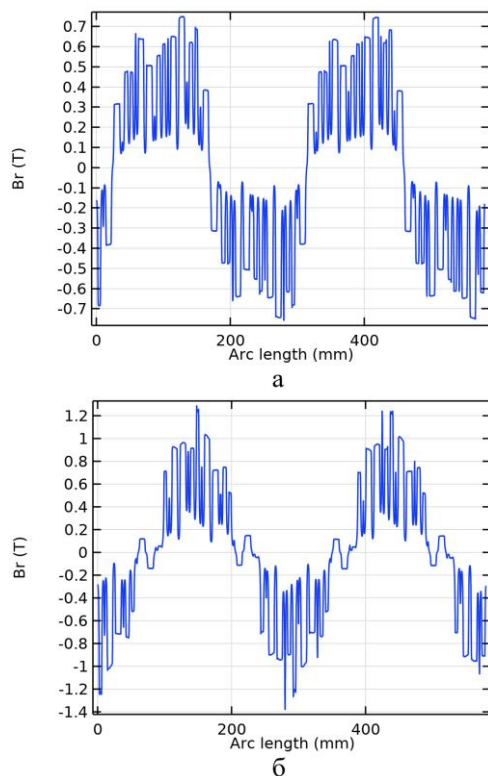


Рис. 3. Распределения радиальной составляющей магнитной индукции  $B_r$  для минимальной нагрузки (а) и номинальной (б)

Временные зависимости электромагнитного момента, приведенные на рис. 4, подтверждают наличие пульсаций момента во всех исследованных режимах. При малых нагрузках пульсаций носят выраженный характер относительно среднего значения момента, тогда как при номинальной нагрузке относительная величина пульсаций уменьшается, однако абсолютная амплитуда колебаний момента остается значительной.

Немонотонный характер зависимостей пульсаций является ожидаемым для реальной зубчатой машины при условии  $\psi_d = \text{const}$ , поскольку при изменении нагрузки одновременно меняется не только моментная составляющая тока, но и степень участия локальных участков магнитопровода в переносе потока. В области малых нагрузок средний электромагнитный момент невелик, поэтому относительная величина пульсаций возрастает даже при умеренной абсолютной амплитуде колебаний, что отражается повышенным  $k_M$ . При этом пространственная зубцовая модуляция  $B_r$  проявляется более контрастно на фоне меньшего среднего уровня поля, а влияние отдельных локальных максимумов в зоне вершин зубцов сильнее влияет на коэффициент, вычисляемый по размаху.

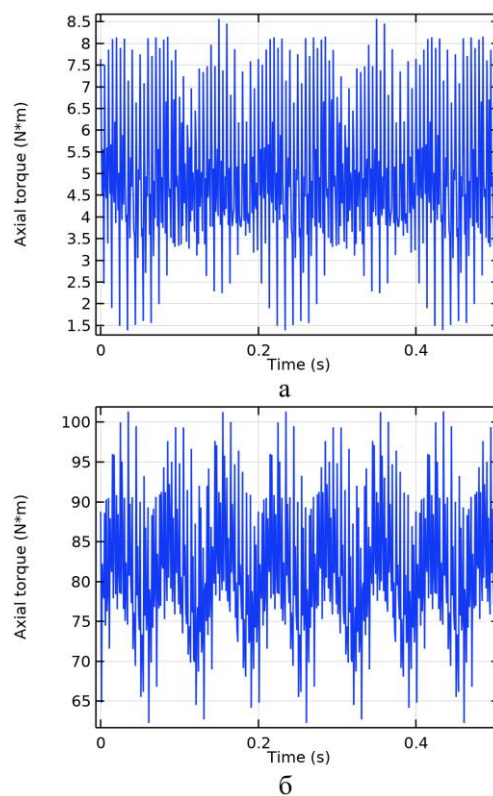


Рис. 4. Пульсации электромагнитного момента для минимальной нагрузки (а) и номинальной (б)

При переходе к средним нагрузкам увеличивается средний уровень момента и одновременно меняется распределение поля в зазоре: часть паразитных составляющих становится менее заметной в относительных показателях, что приводит к уменьшению  $k_B$  и  $k_M$  и появлению минимума. Однако при дальнейшем увеличении нагрузки возрастает вероятность локального насыщения в зоне зубцов и ярма, что приводит к усилению высших гармоник распределения индукции и к росту неравномерности  $B_r$ . В результате, несмотря на поддержание  $\psi_d$  на заданном уровне, пульсации вновь увеличиваются из-за нелинейности магнитной цепи и изменения жесткости магнитного пути.

Отдельного внимания заслуживает различие режимов по сочетаниям  $f_1$  и  $f_2$ : при изменении частоты и направления вращения поля в роторной цепи изменяется взаимное скольжение пространственных гармоник относительно ротора и статора, что может приводить к перераспределению вкладов отдельных гармоник в момент. Что может стать дальнейшим направлением исследования сопоставления режимов не только по коэффициентам пульсаций, но и по спектральным признакам доминирующих гармоник.

Практический вывод из полученных зависимостей состоит в том, что критерий выбора режима ортогонального управления целесообразно формировать как многокритериальный. В классической постановке «оптимальный» режим часто выбирается по энергетическим показателям (КПД, коэффициент мощности) и ограничениям по нагреву, однако результаты моделирования показывают необходимость дополнительного ограничения по пульсациям. В инженерном виде задача может быть сформулирована как поиск компромиссной области по сетке  $\omega-M$ , где

одновременно выполняются: 1) допустимый нагрев; 2) удовлетворительные энергетические показатели; 3) приемлемый уровень пульсаций. Такой подход приводит к построению паритетной области режимов, где улучшение КПД достигается ценой роста пульсаций (или наоборот). Для приводов, чувствительных к вибрациям и динамическим нагрузкам, предпочтительна область минимальных  $k_M$  при допустимых энергетических показателях, даже если она не совпадает с номинальной точкой.

Следует подчеркнуть, что полученные значения  $k_B$  и  $k_M$  относятся к принятой двумерной постановке и отражают влияние зубчато-пазовой структуры и магнитного насыщения в поперечном сечении машины. При наличии конструктивных мер сглаживания (в первую очередь продольного скоса пазов) и при учете осевых эффектов, связанных с лобовыми частями обмоток, абсолютные уровни пульсаций могут отличаться, как правило, в сторону уменьшения. Поэтому представленные результаты целесообразно рассматривать как консервативную оценку, пригодную для сравнительного анализа режимов управления и выявления тенденций изменения пульсаций при росте нагрузки.

Полученные результаты показывают, что номинальный режим работы асинхронного двигателя, определяемый по условиям нагрева и энергетических показателей, не соответствует минимальному уровню пульсаций магнитного поля и электромагнитного момента. Отсутствие конструктивных мер по снижению пульсаций, таких как скос зубцов, приводит к сохранению высокого уровня пространственной неравномерности магнитной индукции в воздушном зазоре даже в расчетном режиме работы машины [19].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

Полученные зависимости пульсаций при ортогональном управлении показывают, что даже при поддержании постоянного потокосцепления и раздельном формировании потоковой и моментной составляющих тока реальная машина, с зубчатым магнитопроводом, сохраняет выраженную пространственную неравномерность поля в воздушном зазоре, которая проявляется в пульсациях электромагнитного момента. Немонотонное изменение уровня пульсаций с ростом нагрузки интерпретируется как смена доминирующих факторов: при малых нагрузках зубцовая модуляция возрастает на фоне малого среднего момента/поля, а при приближении к номинальному режиму вклад локального насыщения зубцовой зоны и усиление пространственных гармоник поддерживают высокий уровень неравномерности поля, особенно при отсутствии конструктивных мер сглаживания (например, скоса зубцов). Тем самым показано, что предпосылки усредненных dq-моделей, используемых в синтезе ортогонального управления, недостаточны для оценки пульсаций, поскольку они не отражают влияния геометрии зубчато-пазовой зоны и нелинейности магнитопровода.

Полученные результаты относятся к двумерной постановке по поперечному сечению и не учитывают ряд трехмерных факторов, влияющих на пульсации: скос пазов, торцевые эффекты и распределение токов по длине проводников. Кроме того, в работе использованы коэффициенты пульсаций, основанные на размахе значений, что обеспечи-

вает наглядность, но не разделяет вклад отдельных гармоник по частоте. Поэтому дальнейшее развитие исследования целесообразно проводить в двух направлениях: 1) дополнить анализ расчетом тангенциальной составляющей индукции  $B_r$  и электромагнитных напряжений в зазоре, что напрямую связано с возбуждением вибраций; 2) выполнить спектральный анализ  $B_r$  и  $M(t)$  для выделения доминирующих гармоник и их изменения при переходе между режимами (включая изменение знака  $f_2$  и повышение скорости до сверхсинхронной). Это позволит сформировать более строгие критерии сравнения режимов ортогонального управления и перейти от качественной интерпретации к количественной декомпозиции причин пульсаций.

Практически результаты могут быть использованы при сравнении законов управления (по критериям пульсаций момента/поля), при обосновании требований к конструкции активной части (меры снижения зубцовых гармоник: скос, оптимизация пазов и т.п.) и при уточнении энергетических и тепловых расчетов. МКЭ-модель позволяет получать не только интегральные показатели, но и пространственно-временную картину поля и источников потерь, что дает основу для дальнейшего сопряженного теплового анализа на базе той же геометрии, где пульсации и локальные пики в зубцовой зоне рассматриваются как фактор дополнительных потерь и локальных перегревов в режимах ортогонального управления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Поползин И.Ю. Электропривод подъемной установки с комбинированным управлением на основе машины двойного питания // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 1. – С. 18-23. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-1-18-23
2. Hu-cheng H. Research on Induction Motor Vector Control System Based on Internal Model Decoupling / H. Hu-cheng, W. Wen-ting, Z. Qun, S. Lei // MATEC Web Conf.. – 2018. – vol. 232. – P. 04029. DOI: 10.1051/matec-conf/201823204029
3. Di Leonardo L. Transient Modeling of Induction Motors Considering Space Harmonics and Iron Losses / L. Di Leonardo, M. Popescu, M. Tursini, F. Parasiliti, M. Carbonieri // Proc. 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM 2020). – 2020. – P. 2553-2559 DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9271007.
4. Yetgin A.G. Analysis of the Effect of the Rotor Slot Type on Torque Ripple in Induction Motors by Finite Element Method / A.G. Yetgin., B. Durmuş // El-Cezerî Journal of Science and Engineering. – 2020. – vol. 7, is. 2. – P. 536–542.
5. Ben Slimene M. Investigation on the Effects of Magnetic Saturation in Six-Phase Induction Machines with and without Cross Saturation of the Main Flux Path/ M. Ben Slimene, M.A. Khelifi // Energies. – 2022. – vol. 15, is. 24. – art. 9412
6. Yunwen X. Analysis of the Effect of the Skewed Rotor on Induction Motor Vibration / X. Yunwen, L. Zhiqiang, K. Defeng, J. Baozhu // Electronics. – 2025. – vol. 14. – P. 2374. DOI: 10.3390/electronics14122374.
7. Zhao H. Harmonic Suppression and Torque Ripple Reduction of a High-Speed Permanent Magnet Spindle Motor / H. Zhao, S. Yu, F. Sun, in IEEE Access. – 2021. – vol. 9. – P. 51695-51702. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3070010.

8. Ключев Г.И. Исследование моделей векторного управления с ориентацией по потокосцеплению ротора // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №10. – С. 538-539. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-538-539

9. Hasan A., et al. Review of Modeling Induction Motor Based on FEM in Ansys Maxwell / A. Hasan, et al. // AIP Conference Proceedings. – 2024. – vol. 3226. – P. 010020. DOI: 10.1063/5.0237711.

10. Щербинин А.Г. Решение электротехнических задач методом конечных элементов: учебно-методическое пособие. – Пермь: ПНИПУ, 2020. –стр. 60.

11. Тутаев Г.М. Теория принятия решений в задачах энергоэффективного управления электроприводом с двигателем двойного питания / Г.М. Тутаев, Е.С. Безбородов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 51-58. DOI 10.14529/power240106.

12. Mencou M., et al. Advanced control of induction motors (2019–2025): A review on recent trends, fault diagnosis, vibration, and energy efficiency. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. – vol. 215. – P. 115574. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115574.

13. Yamazaki K. Torque Ripple Generation Mechanism of Induction Motors by Time and Space Harmonic Fields / K. Yamazaki, Y. Shimada // IEEE Transactions on Magnetics. – 2023. – vol. 59, – is. 6. – P. 1-4. DOI: 10.1109/TMAG.2023.3261439

14. Тутаев Г.М. Верификация модели асинхронного двигателя с фазным ротором 4AK160M4Y3 при ортого-

нальном управлении в COMSOL Multiphysics® / Г.М. Тутаев, Е.С. Безбородов // Вестник Чувашского университета. – 2025. – № 4. – С. 134-144. DOI 10.47026/1810-1909-2025-4-134-144.

15. Koester N. Modelling stranded wires using homogenization and the Cauver ladder method / N. Koester, F. Pichler, O. Biro // COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2023. – vol. 42, is. 5. – P. 1090–1100. DOI: 10.1108/COMPEL-01-2023-0008

16. Silveyra M Torque calculation method for axial-flux electrical machines in finite element analysis / M. Silveyra, C. Garrido // Finite Elements in Analysis and Design. – 2023. – vol. 224. – P. 104042. DOI: 10.1016/j.finel.2023.104042.

17. Jamali-Fard A. EMDLAB: An open-source software for finite element analysis of electrical machines with Arkkio's method implementation / A. Jamali-Fard, M. Mirsalim, T. Sharifi, N. Majlesi // SoftwareX. – 2025. – vol. 29. – P. 102236. DOI: 10.1016/j.softx.2025.102236.

18. Pura P. Rotor Current Feedback Based Direct Power Control of a DFIG with Back-to-Back Converter in Stationary Orthogonal Reference Frame / P. Pura, R. Choudhary, B.S. Rajpurohit, F.M. Gonzalez-Longatt // Energies. – 2021. – vol. 14, is. 11. – Art. 3289. DOI: 10.3390/en14113289.

19. ГОСТ IEC 60034-1-2024. Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения и эксплуатационные характеристики (IEC 60034-1:2022, IDT). – М.: Стандартинформ, 2024.

DOI: 10.24892/RIJIE/20260101

# Assessment of Magnetic Field and Torque Ripple in a Wound-Rotor Induction Motor under Orthogonal Control

Bezborodov E.S.

National Research Mordovia State University  
Saransk, Russian Federation  
[egor.bez-off@yandex.ru](mailto:egor.bez-off@yandex.ru)

**Abstract.** The paper investigates the relationship between air-gap magnetic field non-uniformity and electromagnetic torque ripple in a wound-rotor induction motor under orthogonal control with constant flux linkage. The study is based on a 2D time-dependent finite-element model implemented in COMSOL Multiphysics, accounting for the slot-tooth geometry of the stator and rotor and the nonlinear magnetic properties of electrical steel. The stator and rotor windings are represented by homogenized multi-turn coils, and the electromagnetic torque is evaluated using the Arkkio method. Ripple factors are introduced for the radial air-gap flux density component and for the electromagnetic torque. Ripple factor dependences on the normalized torque are obtained

for different combinations of stator and rotor current frequencies, revealing a non-monotonic behavior with increasing load. The results show that the rated operating point (defined by thermal and energy performance) does not correspond to the minimum ripple level, which highlights the need to consider slotting harmonics and magnetic saturation when assessing drive dynamic performance and comparing control laws.

**Keywords:** wound-rotor induction motor, orthogonal control, finite element method, air-gap flux density, torque ripple, slotting harmonics, COMSOL Multiphysics.