Научная статья
УДК 621.313.333.1
DOI: 10.14529/power260207

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИЙ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ

***Г.М. Тутаев**, tutaevgm@mail.ru*
***Е.С. Безбородов**, egor.bez-off@yandex.ru*
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия

Аннотация. В работе выполнен спектральный анализ пульсаций магнитной индукции в воздушном зазоре и электромагнитного момента асинхронного двигателя с фазным ротором при ортогональном управлении. Цель исследования состоит в установлении закономерностей формирования гармонического состава указанных сигналов в реальной зубцово-пазовой магнитной системе машины. Исследование проведено на основе двухмерной конечно-элементной электромагнитной модели двигателя 4АК160М4У3, реализованной в среде COMSOL Multiphysics. Рассмотрены четыре характерных режима работы при различных сочетаниях частоты питания статора, частоты тока ротора и нагрузки. Для анализа использованы временные зависимости радиальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции в фиксированной точке воздушного зазора, а также электромагнитного момента; спектры получены методом дискретного преобразования Фурье. Установлено, что выполнение условий ортогонального управления в среднем за период не устраняет конструктивно обусловленные пульсации, связанные с зубцово-пазовой модуляцией магнитной проводимости зазора. Показано, что спектральная структура исследуемых сигналов формируется устойчивыми семействами несущих частот и боковых полос, положение которых определяется механической скоростью вращения, частотой питания статора и конструктивными параметрами машины. Полученные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов компенсации пульсаций момента и поля, а также при оценке дополнительных потерь и теплового состояния двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, магнитная индукция, пульсации электромагнитного момента, ортогональное управление, спектральный анализ, зубцово-пазовая модуляция

Для цитирования: Тутаев Г.М., Безбородов Е.С. Спектральный анализ пульсаций магнитной индукции в асинхронном двигателе с фазным ротором при ортогональном управлении // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2026. Т. 26, № 2. С. 65–72. DOI: 10.14529/power260207

Original article
DOI: 10.14529/power260207

SPECTRAL ANALYSIS OF MAGNETIC FLUX DENSITY PULSATIONS IN A WOUND-ROTOR INDUCTION MOTOR UNDER ORTHOGONAL CONTROL

***G.M. Tutaev**, tutaevgm@mail.ru*
***E.S. Bezborodov**, egor.bez-off@yandex.ru*
National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Abstract. This paper presents a spectral analysis of air-gap magnetic flux density pulsations and electromagnetic torque ripple in a wound-rotor induction motor under orthogonal control. The study aims to identify the patterns governing the harmonic content of these signals in a real slotted magnetic system. The investigation is based on a two-dimensional finite element electromagnetic model of a 4AK160M4U3 motor developed in COMSOL Multiphysics. The paper explores four representative operating conditions with different combinations of stator supply frequency, rotor current frequency, and load torque. The analysis employs the time-domain waveforms of the radial and tangential components of the air-gap magnetic flux density at a fixed point, as well as the electromagnetic torque waveform. The spectra are obtained using the discrete Fourier transform. The paper demonstrates that satisfying the orthogonal control conditions in an averaged sense does not completely eliminate structurally induced pulsations caused by the slotting-related modulation of the air-gap permeance. The spectral structure of the analyzed signals consists of the stable families of carrier components and sidebands. Their locations are determined by the mechanical speed, stator

© Тутаев Г.М., Безбородов Е.С., 2026

supply frequency, and motor design parameters. The obtained results can be applied in the development of torque-ripple and field-pulsation mitigation techniques, as well as in assessing additional losses and the thermal state of the motor.

Keywords: wound-rotor induction motor, magnetic flux density, electromagnetic torque ripple, orthogonal control, spectral analysis, slotting-related modulation

For citation: Tutaev G.M., Bezborodov E.S. Spectral analysis of magnetic flux density pulsations in a wound-rotor induction motor under orthogonal control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2026;26(2):65–72. (In Russ.) DOI: 10.14529/power260207

Введение

Асинхронный двигатель с фазным ротором (АДФР), включенным по схеме двойного питания, представляет интерес для регулируемого электропривода и реализации энергоэффективных законов управления [1–3]. Одним из таких законов является ортогональное управление, при котором поддерживается постоянство результирующего потокосцепления в воздушном зазоре $\psi_\delta = \text{const}$, а вектор тока статора I_c формируется ортогонально вектору ψ_δ [1, 4, 5]. Однако в реальной машине выполнение этих условий осложняется зубцово-пазовой модуляцией магнитной проводимости воздушного зазора, локальным насыщением и пространственно-временными гармониками поля, которые в усреднённых моделях учитываются приближённо либо не учитываются вовсе [6]. Поэтому для анализа пульсаций магнитной индукции и электромагнитного момента в работе используется конечно-элементная модель, позволяющая учитывать геометрию зубцово-пазовой зоны и связанные с ней гармоники поля [7–9].

Целью работы является установление закономерностей формирования пульсаций магнитной индукции в воздушном зазоре и электромагнитного момента асинхронного двигателя с фазным ротором при ортогональном управлении, обеспечивающем выполнение условий $\psi_\delta \perp I_c$ и $\psi_\delta = \text{const}$ в среднем за период.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: построены установившиеся режимы работы МКЭ-модели АДФР для четырёх характерных режимных точек; получены временные зависимости $T_e(t)$, $B_r(t)$, $B_t(t)$; выполнен их спектральный анализ методом дискретного преобразования Фурье; установлено соответствие доминирующих спектральных составляющих расчётным опорным частотам, определяемым конструкцией машины и режимом её работы. Практическая значимость работы состоит в уточнении ограничений реализации ортогонального управления в реальной зубцово-пазовой магнитной системе и в формировании требований к алгоритмам подавления пульсаций момента и поля.

Материалы и методы

Объектом исследования является АДФР 4AK160M4Y3 с числом пар полюсов $p = 2$, числом пазов статора $Z_c = 60$ и ротора $Z_p = 72$. Для данного двигателя ранее была разработана и верифицирована электромагнитная модель в COMSOL Multiphysics 6.0 [9]. Данная модель впоследствии использовалась для спектрального анализа пульсаций электромагнитного момента и магнитной индукции в воздушном зазоре. В рамках настоящей работы анализ пульсаций выполняется при ортогональном управлении, обеспечивающем условия $\psi_\delta \perp I_c$ и $\psi_\delta = \text{const}$, при этом основное внимание уделяется гармоническому составу поля в воздушном зазоре и электромагнитного момента.

Электромагнитное моделирование выполнено в COMSOL Multiphysics 6.0 с использованием интерфейса Rotating Machinery, Magnetic в двухмерной постановке с учётом осевой длины машины [10, 11]. Вращение ротора задаётся через вращающуюся область в интерфейсе Rotating Domain с подвижной сеткой. Электромагнитный момент вычисляется средствами интерфейса по тензору напряжений Максвелла, что позволяет анализировать как среднее значение момента, так и его пульсации во времени.

Для обеспечения сопоставимости режимов в исследовании используются синусоидальные токи в фазах статора I_c и ротора I_p, а также общие фазовые сдвиги φ_{0c}, φ_{0p}, обеспечивающие ортогональность. Следует отметить, что ток статора задаётся с учётом наличия параллельных ветвей в обмотках фаз.

Ортогональность $\psi_\delta \perp I_c$ контролировалась по углу между вектором тока статора в координатах $\alpha\beta$ и вектором основной пространственной гармоники потока в воздушном зазоре ψ_δ, восстановленной из радиальной составляющей магнитной индукции [1, 5]. Для исключения геометрического смещения оси фазы введён постоянный угловой сдвиг θ_0, определяемый единожды по геометрии и выборке катушек фазы A. Фазовые сдвиги φ_{0c}, φ_{0p} задавались согласно алгоритму управления из модели системы управления, выполненной в MATLAB Simulink таким образом, чтобы средняя ошибка ортогональности была минимальной. При этом подчёркивается, что выполнение условия ортогональности в каждый момент времени ограничено пульсациями поля и момента, вызванными зубцово-пазовой модуляцией и нелинейностью магнитной системы.

Для анализа пульсаций магнитной индукции использовались временные зависимости радиаль-

Таблица 1

Режимы моделирования

Table 1

Simulation modes

	f_c, Гц	$f_р$, Гц	M, о.е.	I_c, А	$I_р$, А	φ_{0c}, град	$\varphi_{0р}$, град
Режим 1	45	–5	1	25,17	26,84	–9,375	–18,9
Режим 2	45	–5	0,05	1,76	11,78	–41,092	–18,9
Режим 3	30	5	1	25,17	26,9	–9,527	–18,9
Режим 4	30	5	0,05	1,76	11,79	–41,089	–18,9

ной и тангенциальной составляющих в фиксированной точке середины воздушного зазора в статической системе координат относительно статора. Компоненты $B_r(t)$ и $B_t(t)$ вычислялись через компоненты поля B_x, B_y в декартовой системе координат по формулам:

$$B_t = -B_x \sin(\text{atan2}(y,x)) + B_y \cos(\text{atan2}(y,x)); \quad (1)$$

$$B_r = B_x \cos(\text{atan2}(y,x)) + B_y \sin(\text{atan2}(y,x)), \quad (2)$$

где atan2(y,x) – угловая координата точки измерения.

Таким образом, в отличие от усредненных моделей, учитывается локальная пространственно-временная модуляция поля в зазоре, включая зубцово-пазовую составляющую [12, 13].

Спектральный анализ выполнялся на установившемся участке сигналов $T_e(t)$, $B_r(t)$, $B_t(t)$ встроенными средствами COMSOL Multiphysics 6.0 с использованием дискретного преобразования Фурье. Анализируемый временной интервал составлял 0–0,2 с при шаге расчёта 0,0001 с, что соответствовало частоте дискретизации 10 кГц, частоте Найквиста 5 кГц и частотному разрешению 5 Гц. Для повышения корректности спектральной оценки применялись параметры Mask DC, Ignore last sample, Shift zero frequency и Scale with sampling period. В дальнейшем анализировались амплитуды гармонических составляющих. Для интерпретации спектров использовались опорные частоты, определяемые конструкцией машины, и их боковые полосы. В качестве базовой конструктивной частоты использовалась частота прохождения пазов ротора [6]

$$f_{р.2} = Z_р f_{мех}, \quad (3)$$

где $Z_р$ – число пазов ротора; $f_{мех}$ – механическая частота вращения вала.

Боковые полосы вокруг несущих частот, соответствующих модуляции зубцово-пазовой ряби основной волной поля при частоте питания статора, идентифицировались по закону [7]:

$$f = f_{паз} \pm k f_c, \quad (4)$$

где $f_{паз}$ – пазовая несущая частота; $k = 1, 2, \ldots$ – порядковый номер боковой полосы или номер шага модуляции; $f_{паз}$ – частота питания статора.

Для оценки спектральной структуры пульсаций при ортогональном управлении рассмотрены четыре режимные точки, отличающиеся частотами токов статора и ротора и уровнем механической нагрузки. В табл. 1 приведены основные параметры режимов моделирования.

Значения φ_{0c} и $\varphi_{0р}$ для каждого режима задавались в соответствии с моделью системы управления в MATLAB Simulink и затем уточнялись по критерию минимизации ошибки ортогональности. Вектор ψ_δ восстанавливался по первой пространственной гармонике распределения $B_r(\theta, t)$, после чего определялся угол между ψ_δ и I_c. В качестве метрики использовалась знаковая ошибка отклонения от ортогональности относительно идеального угла 90°:

$$\Delta\varphi = |\varphi| - 90°, \quad (5)$$

где φ – угол между векторами тока статора и магнитного потока.

В установившемся режиме отклонение от ортогональности оставалось малым: для режимов 1 и 3 ошибка находилась в диапазоне от –0,9 до +1,2°, а для режимов 2 и 4 – от –0,3 до +0,2°. Следовательно, влияние ошибки реализации ортогонального управления на спектральный состав анализируемых сигналов в рассматриваемых режимах является малым по сравнению с влиянием зубцово-пазовой модуляции и режимных факторов.

Результаты и обсуждение

Для интерпретации результатов спектрального анализа, согласно формулам (3) и (4), идентифицировали основные опорные частоты, обусловленные геометрией и кинематикой машины согласно режимам моделирования (табл. 2). Основными частотами являются частота пазов ротора, её субгармоника, а также боковые полосы вокруг несущих.

Таблица 2

Опорные частоты по режимам

Table 2

Reference frequencies by modes

Формула	Режим	
	1–2	3–4
f_c, Гц	45	30
$f_р$, Гц	–5	5
$f_{мех} = \frac{f_c - f_р}{2}$, Гц	25	12,5
$f_{р,1} = Z_р \frac{f_{мех}}{2}$, Гц	900	450
$f_{р,2} = Z_р f_{мех}$, Гц	1800	900
$f_{с,1} = Z_с \frac{f_c}{2}$, Гц	1350	900
$f_{с,2} = Z_с f_c$, Гц	2700	1800

Спектры радиальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции получены по временным зависимостям в фиксированной точке середины воздушного зазора (рис. 1–6). Для повышения читаемости результатов спектры сгруппированы по уровню нагрузки.

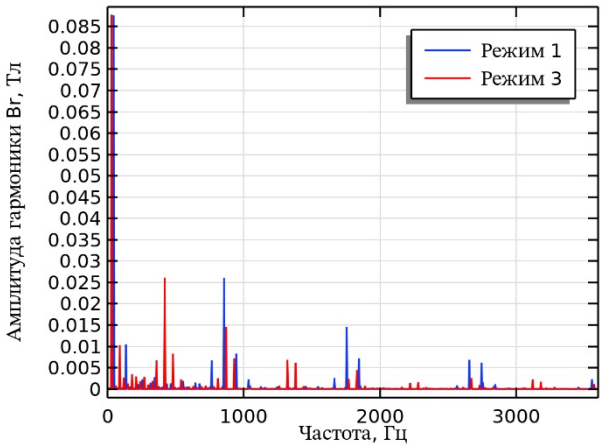

Рис. 1. Спектр радиальной составляющей магнитной индукции $B_r(t)$ для режимов 1 и 3
Fig. 1. Spectrum of the radial component of magnetic flux density $B_r(t)$ for modes 1 and 3

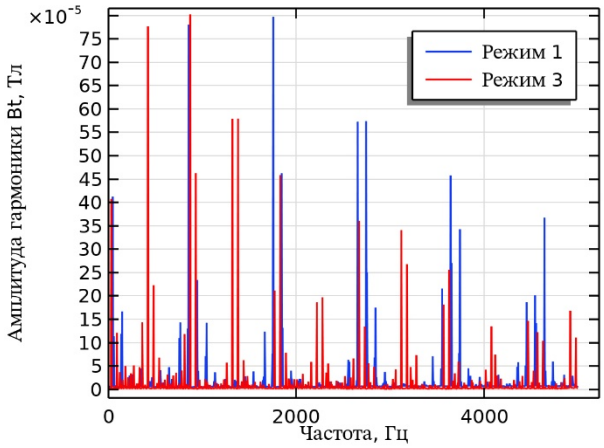

Рис. 2. Спектр тангенциальной составляющей магнитной индукции $B_t(t)$ для режимов 1 и 3
Fig. 2. Spectrum of the tangential component of magnetic flux density $B_t(t)$ for modes 1 and 3

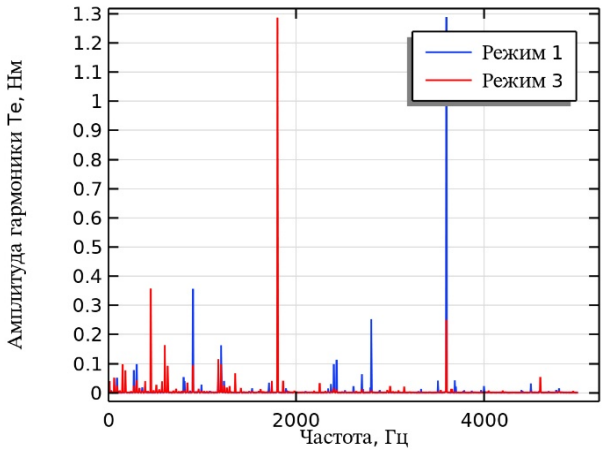

Рис. 3. Спектр электромагнитного момента $T_e(t)$ для режимов 1 и 3
Fig. 3. Spectrum of the electromagnetic torque $T_e(t)$ for modes 1 and 3

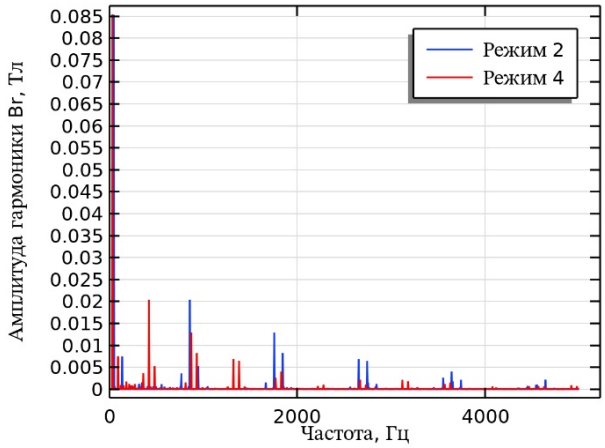

Рис. 4. Спектр радиальной составляющей магнитной индукции $B_r(t)$ для режимов 2 и 4
Fig. 4. Spectrum of the radial component of magnetic flux density $B_r(t)$ for modes 2 and 4

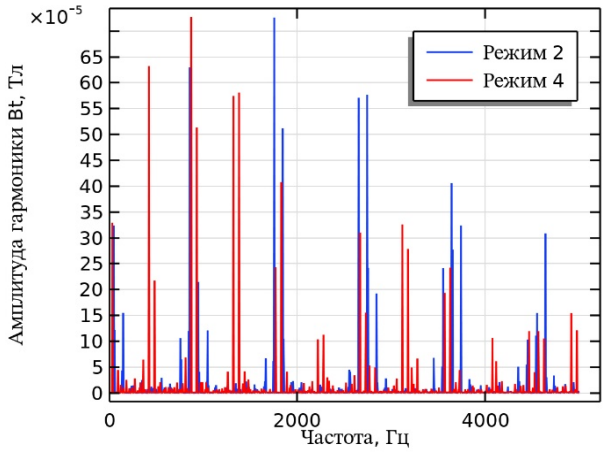

Рис. 5. Спектр тангенциальной составляющей магнитной индукции $B_t(t)$ для режимов 2 и 4
Fig. 5. Spectrum of the tangential component of magnetic flux density $B_t(t)$ for modes 2 and 4

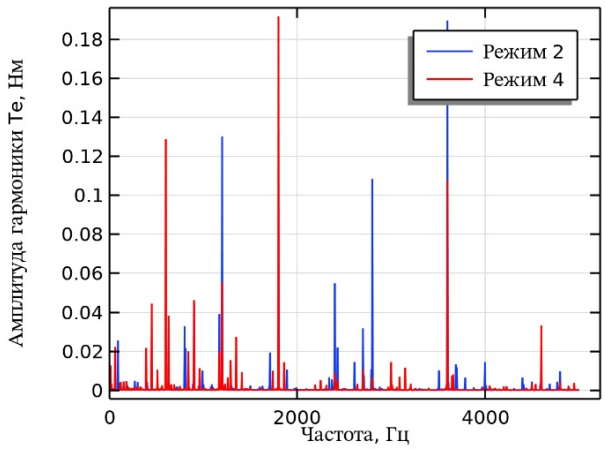

Рис. 6. Спектр электромагнитного момента $T_e(t)$ для режимов 2 и 4
Fig. 6. Spectrum of the electromagnetic torque $T_e(t)$ for modes 2 and 4

По рис. 1–3 видно, что при переходе от режима 1 к режиму 3 изменяются положение пазовых несущих и шаг боковых полос. При этом сохраняется характер спектрального распределения: присутствуют несущие зубцово-пазового происхождения и их боковые полосы, что подтверждает

конструктивную обусловленность наблюдаемых гармоник. Наиболее выраженные группы гармоник обычно фиксируются в спектре $B_t(t)$, что согласуется с тем, что момент определяется взаимодействием составляющих поля в зазоре и спектр момента наследует спектральные особенности B_t (см. рис. 3).

Из рис. 4–6 видно, что при малой нагрузке частотная структура сохраняет тот же тип, однако уровни гармоник и пульсаций в целом уменьшаются, что объясняет снижение абсолютных амплитуд спектральных линий. Аналогично режимам с высокой нагрузкой в спектрах для режимов 2 и 4 отчётливо проявляется смена шага боковых полос при изменении частоты питания статора.

МКЭ-модель показывает, что конструктивно обусловленная зубцово-пазовая модуляция магнитной проводимости зазора сохраняется даже при постоянстве ψ_δ и формирует устойчивые спектральные семейства (несущие и боковые полосы). Следовательно, идеальная ортогональность в каждый момент времени ограничена пульсациями поля и момента: угол между ψ_δ и I_c неизбежно испытывает колебания, обусловленные пространственно-временной модуляцией и нелинейностью магнитной системы.

С практической точки зрения это означает, что для высокоточной реализации ортогональности в реальной системе управления требуется учёт выявленных пульсаций, например фильтрация и/или компенсация гармоник [14, 15]. При росте нагрузки задача усложняется как из-за усиления модуляции, в том числе и вследствие усиления локального насыщения в зубцовой зоне, так и из-за ограниченности ресурсов управления по напряжению/току и быстродействию преобразователей.

Следует отметить, что полученные результаты относятся к двухмерной электромагнитной постановке и к локальному анализу поля в фиксированной точке середины воздушного зазора. В работе не рассматривались трёхмерные краевые эффекты, осевая неравномерность поля и полное пространственное разложение магнитной индукции по окружности зазора. Кроме того, фазовые сдвиги токов на текущем этапе корректировались вне связанной расчётной схемы COMSOL-Simulink. Поэтому полученные спектры следует рассматривать как достоверную оценку основных семейств пульсаций и их режимных смещений, но не как окончательно исчерпывающее описание всех составляющих пространственно-временного поля.

Вывод

На основе МКЭ-модели асинхронного двигателя с фазным ротором, работающего по схеме двойного питания при ортогональном управлении, выполнен спектральный анализ пульсаций радиальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции в воздушном зазоре, а также электромагнитного момента. Установлено, что выполнение условий $\psi_\delta = \text{const}$ и $\psi_\delta \perp I_c$ в среднем за период не устраняет конструктивно обусловленные пульсации, связанные с зубцово-пазовой модуляцией магнитной проводимости зазора.

Показано, что спектральная структура сигналов $T_e(t)$, $B_r(t)$ и $B_t(t)$ определяется семействами несущих частот и боковых полос, положение которых зависит от механической частоты вращения, частоты питания статора и конструктивных параметров машины. При изменении режима работы наблюдается смещение несущих частот и изменение шага боковых полос, что подтверждает физическую связь наблюдаемых гармоник с геометрией машины и параметрами питания.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что практическая реализация ортогонального управления в реальном АДФР требует учёта неизбежных пульсаций поля и момента. Следовательно, при синтезе алгоритмов управления и регуляторов необходимо предусматривать меры по снижению влияния конструктивных гармоник, прежде всего в режимах повышенной нагрузки и в областях спектрального сгущения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов компенсации пульсаций и при последующем анализе дополнительных потерь и теплового состояния машины.

Список литературы

1. Bodson M. Speed Control for Doubly Fed Induction Motors With and Without Current Feedback // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2020. Vol. 28, no. 3. P. 898–907. DOI: 10.1109/TCST.2019.2898372

2. Mahfoud S., El Ouanjli N., Derouich A. Technical study of innovative strategies of direct torque control for doubly fed induction motor – A review // Computers and Electrical Engineering. 2025. Vol. 126. P. 110498. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2025.110498

3. Тутаев Г.М., Безбородов Е.С. Теория принятия решений в задачах энергоэффективного управления электроприводом с двигателем двойного питания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2024. Т. 24, № 1. С. 51–58. DOI: 10.14529/power240106

4. Control of a Three-Phase Wound-Rotor Induction Motor Drive for Automation Applications / M. Mengoni, G. Rizzoli, L. Zarri et al. // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2019. P. 1267–1272. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785281

5. Тутаев Г.М., Безбородов Е.С. Верификация модели асинхронного двигателя с фазным ротором 4АК160М4У3 при ортогональном управлении в COMSOL Multiphysics® // Вестник Чувашского университета. 2025. № 4. С. 134–144. DOI: 10.47026/1810-1909-2025-4-134-144

6. Yamazaki K., Shimada K. Torque Ripple Generation Mechanism of Induction Motors by Time and Space Harmonic Fields // IEEE Transactions on Magnetics. 2023. Vol. 59, no. 5. P. 1–5. DOI: 10.1109/TMAG.2023.3261439

7. Torque Ripple Investigation in Squirrel Cage Induction Machines / A. Marfoli, G. Sala, L. Papini et al. // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2019. P. 140–146. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785364

8. Математическая модель асинхронного двигателя с учетом пазовых гармоник в индукции магнитного поля и неисправностей различного типа / В.В Харламов, А.В. Скляр, Д.И. Попов, А.В. Ерошенко // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 55–58. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-55-58

9. Безбородов Е.С. Разработка математической модели асинхронного двигателя с фазным ротором в COMSOL Multiphysics® для оценки энергетических параметров в стационарном режиме // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2024. Т. 24, № 4. С. 30–36. DOI: 10.14529/power240404

10. Rezaee-Alam F., Hosseini M., Rezaeealam B. A new hybrid analytical model for electromagnetic analysis of wound rotor induction motors // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. 2022. Vol. 35, iss. 6. P. e3022. DOI: 10.1002/jnm.3022

11. Analysis of electromagnetic torque for induction motors with a novel non-skewed rotor structure / A. Darjazini, A. Vahedi, A. Nobahari, S. Gharehseyed // COMPEL. 2022. Vol. 41, no. 1. P. 238–257. DOI: 10.1108/COMPEL-03-2021-0106

12. Improved air gap permeance modelling for single-slice magnetic equivalent circuits of skewed induction motors / P. Desenfans, Z. Gong, D. Vanoost et al. // COMPEL. 2024. Vol. 43, no. 3. P. 475–492. DOI: 10.1108/COMPEL-11-2023-0573

13. Yetgin A.G. Investigation of the Effects of Stator Slot Permeance on Induction Motor and Obtaining the Best Starting Torque Using Permeance Calculation // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2020. Vol. 43, no. 1. P. 25–29. DOI: 10.1109/CJECE.2019.2914959

14. Ou L., Wang X., Xiong F., Ye C. Reduction of torque ripple in a wound-rotor brushless doubly-fed machine by using the tooth notching // IET Electric Power Applications. 2018. Vol. 12, iss. 5. P. 635–642. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0683

15. Torque ripple suppression strategy of asynchronous motor for electric vehicle based on random pulse position space vector pulse width modulation with uniform probability density / F. Xie, W. Wu, W. Hong, C. Qiu // IET Electric Power Applications. 2021. Vol. 15, iss. 8. P. 1068–1080. DOI: 10.1049/elp2.12081

References

1. Bodson M. Speed Control for Doubly Fed Induction Motors With and Without Current Feedback. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2020;28(3):898–907. DOI: 10.1109/TCST.2019.2898372

2. Mahfoud S., El Ouanjli N., Derouich A. Technical study of innovative strategies of direct torque control for doubly fed induction motor – A review. *Computers and Electrical Engineering*.2025;126:110498. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2025.110498

3. Tutaev G.M., Bezborodov E.S. The theory of decision-making in problems of energy-efficient electric drive control with a double inverter-fed induction motor. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2024;24(1):51–58. (In Russ.) DOI: 10.14529/power240106

4. Mengoni M., Rizzoli G., Zarri L., Tani A., Amerise A., Serra G. Control of a Three-Phase Wound-Rotor Induction Motor Drive for Automation Applications. In: *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. 2019. P. 1267–1272. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785281

5. Tutaev G.M., Bezborodov E.S. Verification of the 4AK160M4Y3 wound-rotor induction motor model under orthogonal control in COMSOL Multiphysics®. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*. 2025;(4):134–144. (In Russ.) DOI: 10.47026/1810-1909-2025-4-134-144

6. Yamazaki K., Shimada K. Torque Ripple Generation Mechanism of Induction Motors by Time and Space Harmonic Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2023;59(5):1–5. DOI: 10.1109/TMAG.2023.3261439

7. Marfoli A., Sala G., Papini L., Bolognesi P., Gerada C. Torque Ripple Investigation in Squirrel Cage Induction Machines. In: *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. 2019. P. 140–146. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785364

8. Kharlamov V.V., Sklyar A.V., Popov D.I., Eroshenko A.V. Mathematical model of induction motor containing slot harmonics effect in magnetic field and various types defects presence. *Omskiy nauchnyy vestnik = Omsk scientific bulletin*. 2018;4(160):55–58. (In Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-55-58

9. Bezborodov E.S. Development of a mathematical model of a wound rotor induction machine in COMSOL Multiphysics® to assess energy parameters in static mode. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2024;24(4):30–36. (In Russ.) DOI: 10.14529/power240404

10. Rezaee-Alam F., Hosseini M., Rezaeealam B. A new hybrid analytical model for electromagnetic analysis of wound rotor induction motors. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*. 2022;35(6):e3022. DOI: 10.1002/jnm.3022

11. Darjazini A., Vahedi A., Nobahari A., Gharehseyed S. Analysis of electromagnetic torque for induction motors with a novel non-skewed rotor structure. *COMPEL*. 2022;41(1):238–257. DOI: 10.1108/COMPEL-03-2021-0106

12. Desenfans P., Gong Z., Vanoost D., Gryllias K., Boydens J., De Gersem H., Pissoort D. Improved air gap permeance modelling for single-slice magnetic equivalent circuits of skewed induction motors. *COMPEL*. 2024;43(3):475–492. DOI: 10.1108/COMPEL-11-2023-0573

13. Yetgin A.G. Investigation of the Effects of Stator Slot Permeance on Induction Motor and Obtaining the Best Starting Torque Using Permeance Calculation. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020;43(1):25–29. DOI: 10.1109/CJECE.2019.2914959

14. Ou L., Wang X., Xiong F., Ye C. Reduction of torque ripple in a wound-rotor brushless doubly-fed machine by using the tooth notching. *IET Electric Power Applications*. 2018;12(5):635–642. DOI: 10.1049/iet-epa.2017.0683

15. Xie F., Wu W., Hong W., Qiu C. Torque ripple suppression strategy of asynchronous motor for electric vehicle based on random pulse position space vector pulse width modulation with uniform probability density. *IET Electric Power Applications*. 2021;15(8):1068–1080. DOI: 10.1049/elp2.12081

Информация об авторах

Тутаев Геннадий Михайлович, д-р техн. наук, заведующий кафедрой электроники и электротехники, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия; tutaevgm@mail.ru.

Безбородов Егор Сергеевич, аспирант кафедры электроники и электротехники, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия; egor.bez-off@yandex.ru.

Information about the authors

Gennady M. Tutaev, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Electronics and Electrical Engineering, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia; tutaevgm@mail.ru.

Egor S. Bezborodov, Postgraduate Student of the Department of Electronics and Electrical Engineering, National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia; egor.bez-off@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 16.03.2026; одобрена после рецензирования 21.05.2026; принята к публикации 21.05.2026.

The article was submitted 16.03.2026; approved after review 21.05.2026; accepted for publication 21.05.2026.