

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ В УПРАВЛЯЕМЫХ АСИНХРОННЫХ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДАХ

В статье проведено исследование изменения электромагнитных параметров управляемых асинхронных специальных электрических приводов. Специальными асинхронными электрическими приводами являются управляемые каскадные электрические приводы цилиндрической и аксиальной конструкций. Исследование динамики изменения параметров было выполнено на основе метода электромагнитного преобразования энергии и теории электромагнитных цепей. В итоге для новых математических моделей электромагнитной системы исследуемых асинхронных электрических приводов определены параметры электромагнитного поля замкнутого витка одной катушки электрической обмотки с электрическим током в однородной среде. Решенная задача является пространственной, так как определено распределение электромагнитной индукции в витке заданной формы электромагнитной катушки. Полученные выводы определения электромагнитных параметров цилиндрических и аксиальных двигателей специальных электрических приводов позволяют правильно решать задачи моделирования, проектирования и улучшения эффективности исследуемых электрических приводов и электромеханических преобразователей энергии цилиндрической и аксиальной конструкций. Результаты исследования применимы для создания системы автоматизированного проектирования исследуемых асинхронных электрических приводов и решения задач моделирования и проектирования. Проведенное исследование позволяет создавать электрические приводы оптимальными, массогабаритными и энергетическими показателями.

**Ключевые слова:** специальный электрический привод, управляемый асинхронный каскадный электрический привод, преобразование энергии, математическое моделирование, электромагнитное поле, электромагнитная система.

**Введение.** Исследование изменения электромагнитных параметров [1–2] управляемых асинхронных специальных электрических приводов [3–4] является довольно трудной задачей [5–6]. Для решения поставленной задачи необходимо правильно определять параметры электромагнитных процессов [7–8], таких как электромагнитный поток, напряженность электромагнитного поля, магнитная индукция [9–10]. От точности определения этих параметров зависит правильность определения мощности и электромагнитного момента [11–12] на валу специальных электрических приводов [13–14]. Результат исследования зависит от типа электрического привода, точности математических моделей, правильности проектирования, системы управления [15–16]. Полученный результат позволит повышать эффективность исследуемых электроприводов [17–18], оптимизировать их соз-

дание [19–20] и автоматизированные системы управления [21–22]. Проводимое исследование необходимо для проектирования и создания новых типов электроприводов [23–24]. Специальные электрические приводы находят применение в таких отраслях промышленности, в машиностроении, электротранспорте, нефтегазовой, сталелитейной, горной, целлюлозно-бумажной, легкой, текстильной и других отраслях промышленности [25–26]. Требования к модернизации технологических и технических процессов, механизмов и оборудования заставляет электротехническую промышленность создавать новые типы электроприводов, к которым относятся асинхронные управляемые специальные электрические приводы [27–28].

Разработана математическая модель электромагнитной системы статора и ротора цилиндрических и аксиальных компонентов специальных асин-

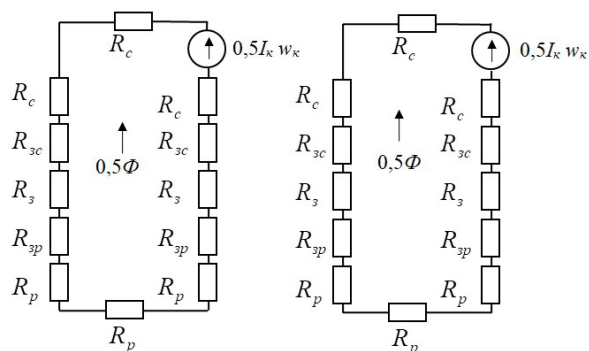


Рис. 1. Схема замещения магнитной цепи

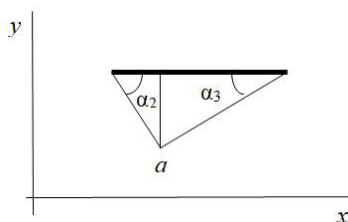


Рис. 2. Рассматриваемый участок

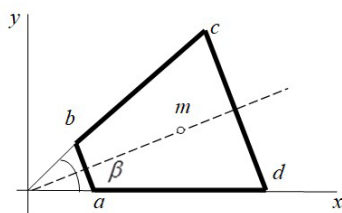


Рис. 3. Круглая катушка

хронных электрических приводов, отличающиеся тем, что электромагнитная система представлена в виде совокупности электромагнитов переменного тока. Схема замещения показана на рис. 1, где  $R_c$  — сопротивление участков яра статора;  $R_{зс}$  — сопротивление участков зубцовой части статора;  $R_з$  — сопротивление воздушного зазора;  $R_{зр}$  — сопротивление участков зубцовой части ротора;  $R_p$  — сопротивление участков яра ротора;  $I_k$  — электрический ток катушки;  $w_k$  — число витков катушки.

В результате использования математической модели электромагнитной системы в виде совокупности электромагнитов переменного тока задача определения электромагнитных параметров в управляемых асинхронных специальных электрических приводах сводится к определению электромагнитных параметров отдельных катушек или катушечных групп, а конечный результат получен в виде суммирования результатов со своим сдвигом в пространстве и времени.

Определяем электромагнитные параметры компонентов специальных электрических приводов. Магнитная индукция, создаваемая электрическим током, протекающим в заданной точке по рассматриваемому участку, равна

$$B = \frac{\mu_a I}{4\pi a} (\cos \alpha_2 + \cos \alpha_3), \quad (1)$$

где  $\mu_a$  — магнитная проницаемость среды, в которой расположен виток;  $I$  — величина тока в участке;  $a$  — перпендикуляр, восстановленный из точки пространства к заданному участку;  $\alpha_2$  — угол между участком и прямой, соединяющей точку пространства и конец этого участка;  $\alpha_3$  — угол между участком и прямой, соединяющей точку пространства и начало этого участка.

Рассматриваемый участок показан на рис. 2.

Произведём рассечение плоскости витка прямой. На плоскости найдем распределение магнитной индукции. Закругленные части секции витка были заменены на прямые, параллельные рассекающей прямой. Виток расположим так, чтобы одна сторона витка была на оси  $ox$ . Вершина сектора данного витка должна располагаться в центре координат. Точка  $m$  может свободно перемещаться по заданной прямой (рис. 3).

Координаты пересечения заданной прямой и двух сторон секций равны  $(a;0)$  и  $(a \cos \beta/2; a \sin \beta/2)$ ,  $\beta$  — угол между сторонами витка.

Представим виток в виде отдельных участков:  $ab$ ,  $bc$ ,  $cd$  и  $da$ . Магнитная индукция в точке  $m$  от действия четырёх участков будет равна

$$B = B_{ab} + B_{bc} + B_{cd} + B_{da}. \quad (2)$$

Определяем электромагнитные параметры компонентов асинхронных управляемых специальных электрических приводов. Ранее была определена магнитная индукция, создаваемая электрическим током, протекающим в заданной точке по рассматриваемому участку [29].

Выражение для магнитной индукции имеет вид:

$$B = \frac{\mu_a I}{4\pi} \left\{ \frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}} - \frac{C_6}{A_7 y \sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}} + \frac{C_7}{A_6 y \sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}} - \frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}} + \frac{C_8}{(A_4 - B_4 y) \sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}} + \frac{C_4}{\sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}} + \frac{C_9}{(A_5 - B_5 y) \sqrt{y^2 - C y + D}} - \frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C y + D}} + \frac{A_2 - B_2 y}{\sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}} + \frac{A_3 y}{\sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}} + \frac{A_1 y}{\sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}} + \frac{A - B y}{\sqrt{y^2 - C y + D}} \right\}, \quad (3)$$

где  $B$  — магнитная индукция;  $\mu_a$  — магнитная проницаемость среды, в которой расположен виток;  $I$  — величина тока в участке;  $a$  — перпендикуляр, восстановленный из точки пространства к заданному участку;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  — произвольно принятые коэффициенты;  $y$  — координата.

Для построения зависимости магнитной индукции  $B$  от  $y$  необходимо рассмотреть каждое слагаемое выражения (3) в отдельности для нахождения экстремума каждой функции и каждого слагаемого  $U_{экстр}$  и определить, максимум это или минимум. Необходимо заметить, что  $y$  изменяется от 0 до  $x \sin \beta$ .

Определение максимума каждой отдельной функции, которая является одним из слагаемых вы-

ражения (3), зависит от её производной по  $y$ . Полученную производную приравняем к нулю и решим полученное уравнение относительно  $y$ . Подставляя значения  $y$ : 0,  $x \sin \beta$  и  $y_{\text{экстр}}$ , получаем значения магнитной индукции по краям рассматриваемого участка (0;  $x \sin \beta$ )  $B$ ,  $B_{\kappa}$  и в точке экстремума  $B_{\text{экстр}}$  каждой отдельной функции.

При анализе функции  $\frac{A_1 y}{\sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}}$  (функция

1) были получены следующие выражения:

$$y_{\max 1} = x - r_{\text{вн}}' \quad (4)$$

$$B_{\text{н}1} = 0; \quad B_{\max 1} = \frac{2r_{\text{вн}}}{x(x - r_{\text{вн}})};$$

$$B_{\kappa 1} = \frac{2r_{\text{вн}}}{(x - r_{\text{вн}})\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}, \quad (5)$$

где  $B_{\text{н}1}$ ,  $B_{\max 1}$ ,  $B_{\kappa 1}$  — начальное, максимальное и конечное значения магнитной индукции для функции 1;

$y_{\max 1}$  — значение  $y$ , при котором магнитная индукция функции 1 максимальна.

При анализе функции  $\frac{A_3 y}{\sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}}$  (функция

2) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}2} = 0; \quad B_{\kappa 2} = \frac{2r_{\text{внеш}}}{(r_{\text{внеш}} - x)\sqrt{x^2 + r_{\text{внеш}}^2}}, \quad (6)$$

где  $B_{\text{н}2}$ ,  $B_{\kappa 2}$  — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 2;  $r_{\text{внеш}}'$ ,  $r_{\text{вн}}$  — внешний и внутренний радиусы компонента электроприбора.

При анализе функции  $\frac{C_4}{\sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}}$  (функция

3) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}3} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + r_{\text{внеш}}^2}}, \quad B_{\kappa 3} = \frac{1}{r_{\text{внеш}} - x}, \quad (7)$$

где  $B_{\text{н}3}$ ,  $B_{\kappa 3}$  — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 3.

При анализе функции  $-\frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C y + D}}$  (функция

4) были получены следующие выражения:

$$y_{\min 4} = \frac{x + r_{\text{вн}}}{2}, \quad (8)$$

$$B_{\text{н}4} = -\frac{1}{\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}; \quad B_{\min 4} = -\frac{\sqrt{2}}{x - r_{\text{вн}}};$$

$$B_{\kappa 4} = -\frac{1}{x - r_{\text{вн}}}, \quad (9)$$

где  $B_{\text{н}4}$ ,  $B_{\min 4}$ ,  $B_{\kappa 4}$  — начальное, минимальное и конечное значения магнитной индукции для функции 4;  $y_{\min 4}$  — значение  $y$ , при котором магнитная индукция функции 4 минимальна.

При анализе функции  $\frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}}$  (функция

5) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}5} = \frac{1}{r_{\text{внеш}} - x}; \quad B_{\kappa 5} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + r_{\text{внеш}}^2}}, \quad (10)$$

где  $B_{\text{н}5}$ ,  $B_{\kappa 5}$  — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 5.

При анализе функции  $-\frac{C_5}{\sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}}$  (функция

6) были получены следующие выражения:

$$y_{\min 6} = \frac{x - r_{\text{вн}}}{2}, \quad (11)$$

$$B_{\text{н}6} = -\frac{1}{x - r_{\text{вн}}}; \quad B_{\min 6} = -\frac{\sqrt{2}}{x - r_{\text{вн}}};$$

$$B_{\kappa 6} = -\frac{1}{\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}, \quad (12)$$

где  $B_{\text{н}6}$ ,  $B_{\min 6}$ ,  $B_{\kappa 6}$  — начальное, минимальное и конечное значения магнитной индукции для функции 6;  $y_{\min 6}$  — значение  $y$ , при котором функция 6 минимальна.

При анализе функции  $\frac{C_8}{(A_4 - B_4 y)\sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}}$  (функция

7) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}7} = \frac{r_{\text{внеш}} - x}{x\sqrt{x^2 + r_{\text{внеш}}^2}}; \quad B_{\kappa 7} = \infty, \quad (13)$$

где  $B_{\text{н}7}$ ,  $B_{\kappa 7}$  — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 7.

При анализе функции  $\frac{C_9}{(A_5 - B_5 y)\sqrt{y^2 - C y + D}}$  (функция

8) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}8} = \frac{x - r_{\text{вн}}}{x\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}; \quad B_{\kappa 8} = \infty, \quad (14)$$

где  $B_{\text{н}8}$ ,  $B_{\kappa 8}$  — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 8.

При анализе функции  $\frac{C_6}{A_7 y \sqrt{y^2 - C_3 y + D_3}}$  (функция

9) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}9} = \infty; \quad B_{\kappa 9} = \frac{r_{\text{внеш}} - x}{x\sqrt{x^2 + r_{\text{внеш}}^2}}, \quad (15)$$

где  $B_{\text{н}9}$ ,  $B_{\kappa 9}$  — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 9.

При анализе функции  $\frac{C_7}{A_6 y \sqrt{y^2 - C_1 y + D_1}}$  (функция

10) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н}10} = \infty; \quad B_{\kappa 10} = \frac{x - r_{\text{вн}}}{x\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}, \quad (16)$$

где  $B_{\text{н}10}$ ,  $B_{\kappa 10}$  — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 10.

При анализе функции  $\frac{A - By}{\sqrt{y^2 - C y + D}}$  (функция

11) были получены следующие выражения:

$$y_{\max 11} = r_{\text{вн}}, \quad (17)$$

$$B_{\text{н11}} = \frac{2r_{\text{вн}}}{(x - r_{\text{вн}})\sqrt{x^2 + r_{\text{вн}}^2}}; \quad B_{\max 11} = \frac{2r_{\text{вн}}}{x(x - r_{\text{вн}})};$$

$$B_{\text{к11}} = 0, \quad (18)$$

где  $B_{\text{н11}}$ ,  $B_{\max 11}$ ,  $B_{\text{к11}}$  — начальное, максимальное и конечное значения магнитной индукции для функции 11;  $y_{\max 11}$  — значение  $y$ , при котором функция 11 максимальна.

При анализе функции  $\frac{A_2 - B_2 y}{\sqrt{y^2 - C_2 y + D_2}}$  (функция

12) были получены следующие выражения:

$$B_{\text{н12}} = \frac{2r_{\text{внешн}}}{(r_{\text{внешн}} - x)\sqrt{x^2 + r_{\text{внешн}}^2}}; \quad B_{\text{к12}} = 0, \quad (19)$$

где  $B_{\text{н12}}$ ,  $B_{\text{к12}}$  — начальное и конечное значения магнитной индукции для функции 12.

По формулам (4) – (19) строим функции 1, 2, 3, ..., 12. Выражения (4) – (19) зависят от угла  $\beta$ ; например, угол  $\beta$  равен 90°, исходя из формы витка обмотки четырёхполюсного аксиального асинхронного электродвигателя. Для получения изменения магнитной индукции (1) во внутренней области витка сложим полученные функции 1, 2, 3, ..., 12, учитывая, что  $r_{\text{вн}} = 1$ ,  $r_{\text{внешн}} = 3$ , а  $x$  будет равно 1,5 для первой зависимости, для второй зависимости — 2, а для третьей — 2,5.

Величина  $x$  указывает местонахождение пересекающей прямой. Для данного рассматриваемого случая величина  $x$ , равная 2, соответствует центру витка. Тогда соответственно 1,5 — одной четвёртой витка, а 2,5 — трём четвёртым.

Предложенная математическая модель электромагнитной системы статора и ротора цилиндрических и аксиальных компонентов специальных асинхронных электрических приводов отличается от существующих моделей и численных методов расчета, например, метода конечных элементов, реализованных в программных продуктах, таких как Elcut, Ansys, Comsol, тем, что позволяет определять электромагнитные параметры исследуемых объектов на основе полученных аналитических выражений. Расчет электромагнитной системы производится по отдельным катушкам или катушечным группам, а конечный результат получен в виде суммирования результатов со своим сдвигом в пространстве и времени.

Для расчета электромагнитных параметров исследуемых устройств необходимо определить максимальную индукцию на каждом из участков схемы замещения (рис. 1) и знать изменение магнитной индукции в пространстве. Расположим зависимости изменения магнитной индукции для различных  $x$  на плоскостях, перпендикулярных заданному витку (рис. 2, 3).

Исследование полученных зависимостей показало, что магнитная индукция в витке такой формы увеличивается с приближением к более широкой части витка и уменьшается при приближении к более узкой его части. Около более узкой части витка магнитная индукция имеет явно выраженную вогнутость, а возле широкой — выпуклость. При рассечении витка вдоль получаем зависимость изменения магнитной индукции в этой плоскости. Так же получаем распределение магнитной индукции

от одной секции обмотки, состоящей из трёх катушек, в каждой из которых один такой виток, смещённых на угол  $360/z$  как в одной плоскости, так и в аксонометрии.

Для определения распределения магнитной индукции в одной секции обмотки рассматриваемого компонента электропривода нужно в формулы (4) – (19) подставить значения внешнего и внутреннего радиусов данного компонента, а также величину  $x$ . Это необходимо сделать в зависимости от того места на витке, где определяется распределение магнитной индукции.

Используя данную методику расчётов, можно провести исследование динамики изменения электромагнитных параметров управляемых специальных электрических приводов во вновь проектируемой конструкции специального электрического привода. Также можно получить распределение магнитной индукции в уже существующих электрических приводах и конструкциях электрических двигателей. Это позволит правильно определять искомые параметры для оптимального проектирования, улучшения эффективности электроприводов. Проведенное исследование позволяет создавать систему контрольных примеров при разработке алгоритмов. Использование алгоритмов оптимального выбора данных позволяет правильно создавать программы расчета исследуемых объектов.

**Заключение.** Используя данную методику расчётов, можно проследить изменение электромагнитных параметров управляемых асинхронных специальных электрических приводов для вновь проектируемой конструкции специального электрического привода и его компонентов — асинхронных двигателей. Также можно получить распределение магнитной индукции в уже существующих электрических приводах и конструкциях. Это позволит правильно определять искомые параметры для оптимального проектирования, улучшения эффективности электроприводов.

Проведенное исследование позволяет создавать систему контрольных примеров при разработке алгоритмов и программ расчета исследуемых объектов, а также разработать конструкции, позволяющие более эффективно использовать магнитную систему как цилиндрических, так и аксиальных электроприводов.

## Благодарности

Отчетное исследование финансировалось РФФИ [Название проекта: Разработка теории оценки качества информации с учетом ее структурной составляющей, № 19-47-230004, от 19.04.2019] и администрацией Краснодарского края. Вся работа по составлению статьи и получению расчетных и экспериментальных данных была равномерно распределена среди ее авторов.

## Библиографический список

1. Кузнецов А. А., Бакланов А. А., Глухих В. А. Измерение тягово-энергетических параметров локомотивов с асинхронным приводом // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2017. № 3 (43). С. 89 – 95.
2. Байрамкулов К. Н. А., Астахов В. И. Расчет магнитного поля в среде с неоднородными и анизотропными свойствами на основе электрической цепи Кирхгофа // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010, № 1. С. 3 – 11.

3. Пат. 2761160 С1 Российская Федерация, МПК В 60 L 1/003; В 60 L 50/10; Н 02 Р 7/295. Способ управления тяговыми электродвигателями маневрового тепловоза, работающего с пневмообдувочной машиной / Овчаренко С. М., Фоменко В. К., Минаков В. А., Носков В. О., Денисов И. Н. № 2021101545. заявл. 25.01.21; опубл. 06.12.21, Бюл. № 34.
4. Татевосян А. А. Оптимизация параметров тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами для линейного привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 6. С. 148–156. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-148-156.
5. Karandey V. Yu., Popov B. K., Afanasev V. L. Research of change of parameters of a magnetic flux of the stator and rotor of special electric drives // IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2018). 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602911.
6. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B., Afanasyev V. L. Determination of electromagnetic parameters for improvement of efficiency of special electric drives // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012164.
7. Бубнов А. В., Четверик А. Н., Чудинов А. Н. Разработка и исследование обобщенной компьютерной модели электропривода с импульсно-фазовым регулированием угловой скорости // Омский научный вестник. 2019. № 2 (164). С. 23–29. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-23-29.
8. Харламов В. В., Москалев Ю. В., Лысенко В. С. Моделирование работы преобразователя для подключения трехфазного асинхронного двигателя к однофазной сети // Практическая силовая электроника. 2020. № 4 (80). С. 14–19.
9. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B., Afanasyev V. L. Research of electrical power processes for optimum modeling and design of special electric drives // Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 157. P. 242–247. DOI: 10.2991/aime-18.2018.47.
10. Сериков А. В., Суздорф В. И. Моделирование электромагнитных процессов в коллекторных электродвигателях с питанием от статических преобразователей // Электротехника. 2016. № 12. С. 39–44.
11. Karandaev A. S., Gasiyarov V. R., Loginov B. M., Khramshin V. R. Force limiting at roll axial shifting of plate mill // Procedia Engineering. International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2017). 2017. Vol. 206. P. 1780–1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.713.
12. Иванов С. Н., Ким К. К., Приходченко О. В., Просолович А. А. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмещенных энергетических устройствах // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. Т. 1, № 1 (41). С. 37–44.
13. Власьевский С. В., Малышева О. А., Мельниченко О. В. Сравнение расчетных сил тяги по сцеплению электровозов переменного тока с асинхронным и коллекторным приводом // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 5. С. 30–36.
14. Козярук А. Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // Электротехника. 2019. № 3. С. 33–37.
15. Лот Н. С., Осипов О. И., Жидков А. М. Перспективы развития электроприводов шахтных подъёмных установок // Приводы и компоненты машин. 2016. № 6 (22). С. 9–12.
16. Соловьев В. А., Дерюжкова Н. Е., Чжо А. Х., Тетерин В. В. Нечеткое управление в системе регулирования позиционных электроприводов стержневой установки // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 5. С. 77–80.
17. Климаш В. С., Соколовский М. А. Повышение эффективности комплекса электроприводов технологического оборудования горноперерабатывающего предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 575–581.
18. Данышина А. А., Кравченко О. А., Бекин А. Б. Методы и способы совершенствования электромеханических систем силокомпенсирующих манипуляторов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64, № 1. С. 69–76. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-69-76.
19. Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Каминский А. В., Коваленко С. В. Методика определения параметров асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64, № 1. С. 30–36. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-1-30-36.
20. Хацевский К. В., Беляков В. Е. Математическое моделирование асинхронного электропривода с дроссельным регулированием скорости // Омский научный вестник. 2016. № 3 (147). С. 49–53.
21. Бурков А. Т., Валинский О. С., Евстафьев А. М. [и др.]. Системы управления тяговым приводом современных локомотивов // Электротехника. 2019. № 10. С. 33–36.
22. Дерюжкова Н. Е., Соловьев В. А., Тетерин В. В., Урасов Д. В. Сравнительная оценка классических и нечетких алгоритмов управления системой электропривода многоточечного формования изделий двойной кривизны // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 52–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-52-57.
23. Mamunts D. G., Morozov S. A., Gaskarov V. D., Saushiev A. V. [et al.]. Development of an automated system for managing and optimizing management decisions in the design, organization and production of dredging // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus 2018). 2018. P. 73–76. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317033.
24. Tleugaliuli T. K., Sarvarov A. S., Berdibekov A. O. Development and optimization of multi-motor asynchronous electric drives for carding machines // 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED), 26–30 March. 2018. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341723.
25. Khrisanov V. I., Dmitriev B. F. The marine electrical power industry with the use of renewable energy carriers. Part 2. Axial multipole synchronous generators with permanent magnets for wind and wave offshore power plants // Russian Electrical Engineering. 2016. Vol. 87, № 10. P. 554–559. DOI: 10.3103/S1068371216100023.
26. Anuchin A., Briz F., Rassudov L. [et al.]. Implementation of fast and accurate modeling method of electric drives // 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 14–14 Oct. 2015. DOI: 10.1109/RTUCON.2015.7343158.
27. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B. [et al.]. Optimization of parameters of special asynchronous electric drives // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052002.
28. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B. [et al.]. Research and analysis of force and moment of the cascade asynchronous electric drives // International conference on innovations and prospects of development of mining machinery and electrical engineering (IPDME 2018). IOP conference series: earth and environmental science. 2018. Vol. 194, № 5. DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052009.
29. Karandey V. Yu., Popov B. K., Popova O. B. [et al.]. Research of electromagnetic parameters for improvement of efficiency of special electric drives and components // 5TH International conference on power generation systems and renewable energy technologies (PGSRET-2019), Istanbul Technical University, Istanbul, 26–27 August 2019. 2019. P. 69–74. DOI: 10.1109/PGSRET.2019.8882689.

**КАРАНДЕЙ Владимир Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий



Кубанского государственного технологического университета (КубГТУ), г. Краснодар.

SPIN-код: 5078-5042

AuthorID (РИНЦ): 591775

Адрес для переписки: erp\_kvy@mail.ru

**ПОПОВА Ольга Борисовна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры информационных систем и программирования КубГТУ, г. Краснодар.

SPIN-код: 1095-6863

AuthorID: 150319

Адрес для переписки: popova\_ob@mail.ru

**ПОПОВ Борис Клавдиевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий КубГТУ, г. Краснодар.

SPIN-код: 7872-1515

AuthorID: 591776

Адрес для переписки: pbk47@mail.ru

**АФАНАСЬЕВ Виктор Леонидович**, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий КубГТУ, г. Краснодар.

SPIN-код: 9019-6653,

AuthorID: 972940

Адрес для переписки: bubuvix@mail.ru

#### Для цитирования

Карандей В. Ю., Попова О. Б., Попов Б. К., Афанасьев В. Л. Исследование изменения электромагнитных параметров в управляемых асинхронных специальных электрических приводах// Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 65 – 70. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-65-70.

Статья поступила в редакцию 24.05.2022 г.

© В. Ю. Карандей, О. Б. Попова, Б. К. Попов,  
В. Л. Афанасьев