

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЕГО МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

*А.Д. Петрушин, А.В. Шевкунова, В.Ю. Смачный*

*Ростовский государственный университет путей сообщения,  
г. Ростов-на-Дону, Россия*

Вентильно-индукторные машины, являющиеся главной составляющей вентильно-индукторного электропривода, – перспективный и недостаточно исследованный электромеханический преобразователь энергии. Данный тип электрических машин имеет возможность расширения своей области применения практически во всех отраслях промышленности. Для создания вентильно-индукторного электропривода, конкурентоспособного на мировом рынке, имеющего высокие технико-экономические показатели, необходимо иметь достоверную, научно обоснованную информацию о взаимосвязи и степени влияния геометрических переменных магнитной системы и среднего значения электромагнитного момента. Цель данной статьи состоит в определении силы и направления связи среднего значения электромагнитного момента и варьирующихся значений геометрических размеров элементов активной части исследуемой машины. По результатам корреляционного анализа установлена степень влияния рассматриваемых конструктивных параметров активной части на среднее значение электромагнитного момента. Расчет численной величины момента осуществлялся посредством пакета прикладных программ MATLAB, взаимодействующей с программой по расчету и визуализации магнитных полей FEMM версии 4.2. Также для получения числовых значений момента был использован стохастический метод, основанный на алгоритме Монте-Карло. Проведенные в статье исследования позволяют судить о наличии соответствующей связи между исследуемыми конструктивными элементами магнитной системы и значением электромагнитного момента, а также об определенной степени их воздействия на формирование его величины.

*Ключевые слова:* вентильно-индукторный двигатель, активная часть, геометрические размеры, электромагнитный момент, корреляционный анализ, зависимость, коэффициент детерминации.

## Введение

Вентильно-индукторная машина (ВИМ) сегодня привлекает внимание многих исследователей и является одним из перспективных электромеханических преобразователей (ЭМП), применение которого обусловлено рядом преимуществ, таких как простота конструкции, надежность, хорошие энергетические и массогабаритные показатели. К тому же ВИМ в настоящее время составляют основу современного вентильно-индукторного электропривода (ВИП) промышленного производства, определяют технико-экономические возможности широкого применения электрической тяги на железнодорожном [1, 2] и автомобильном транспорте [3–5], обеспечивают соответствующие силовые функции и режимы работы электроприводов станочного оборудования, сложных робототехнических систем [6–8] и другого технологического оборудования автоматизированных производств.

Для согласования механических характеристик ВИМ и производственного объекта обычно используют такие выходные параметры, как электромагнитный момент и частоту вращения вала. Указанные параметры определяются конфигурацией активной части ВИМ, которая в свою очередь состоит из ярма и зубцов статора, ярма и зубцов ротора, а также обмотки статора. Для создания

ВИП, конкурентоспособного на мировом рынке, имеющего высокие технико-экономические показатели, необходимо иметь достоверную, научно обоснованную информацию о взаимосвязи и степени влияния геометрических переменных магнитной системы и среднего значения электромагнитного момента.

Довольно часто в процессе исследования необходимо определить или исключить наличие взаимосвязи между различными величинами процесса. Переменные могут быть связаны функциональной (жестко детерминированной) либо стохастической (вероятностной, статистической) зависимостью. Как известно, при функциональной связи каждому значению одного независимого признака соответствует строго определенное значение другого зависимого признака. При вероятностной же зависимости между наблюдаемыми переменными значению факторного признака соответствует множество возможных значений результирующего признака, т. е. когда значению одной величины соответствует определенное распределение другой величины. Частным случаем стохастической зависимости является корреляционная зависимость, которая позволяет определить силу и направление взаимосвязи между переменными. Именно такой характер зависимости и имеют геометрические размеры фрагментов магнит-

ной системы и среднее значение электромагнитного момента.

Цель данной статьи состоит в том, чтобы опрелелить тесноту, направление связи и тенденцию изменения среднего значения электромагнитного момента под действием варьирующихся значений геометрических размеров элементов активной части ВИМ. Также полученные результаты дают возможность установить степень влияния различных конструктивных параметров зубцово-пазовой зоны активной части на среднее значение электромагнитного момента.

## Основная часть

Термин «корреляция» (от лат. *correlatio* – соотношение, связь, зависимость) был впервые применен Ж. Кювье в 1806 году. Первое математическое описание метода было произведено О. Браве в 1846 году. В настоящее время корреляционный анализ является достаточно широко распространенным, гибким и эффективным инструментом обработки статистических данных. Данный метод нашел свое применение в самых различных областях науки и техники [9–12].

В рамках данной статьи в качестве исследуемого объекта был взят за основу однофазный вентильно-индукторный двигатель (ВИД) с конфигурацией магнитной системы 6/6 (зубцов статора – 6, зубцов ротора – 6), спроектированный для систем вентиляции, с номинальной мощностью 234 Вт и моментом, равным 1,49 Н·м. Обеспечение ненулевого значения пускового момента в данном типе ВИД обеспечивается установкой ротора в стартовое положение с помощью постоянных магнитов.

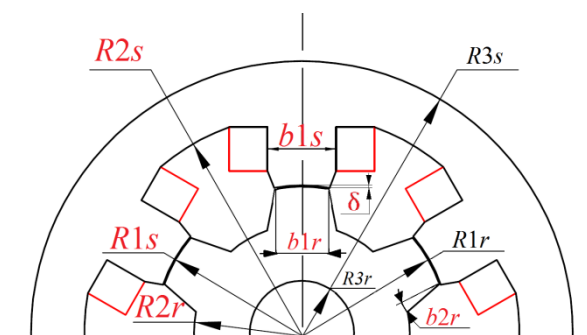


Рис. 1. Фрагмент исследуемой магнитной системы

В качестве факторного параметра выступали вариации численных значений различных конструктивных переменных магнитной системы ВИД, а в качестве результативного параметра – среднее значение электромагнитного момента. Геометрические размеры, значения которых по отдельности были рассмотрены, изображены на рис. 1 и выделены красным цветом. Таким образом, была рассмотрена связь среднего значения электромагнитного момента с геометрическими величинами следующих параметров магнитной системы: радиус

расточки статора, мм ( $R1s$ ); радиус статора по пазам, мм ( $R2s$ ); ширина зубца статора, мм ( $b1s$ ); наклон боковой поверхности зубца статора, град. ( $b2s$ ) (на рис. 1 данный элемент не изображен, так как  $b2s = 0$ ); радиус ротора по пазам, мм ( $R2r$ ); ширина коронки зубца ротора, мм ( $b1r$ ); наклон боковой поверхности зубца ротора, град. ( $b2r$ ) и воздушный зазор, мм ( $\delta$ ). В качестве ограничений для расчетов числовых значений вышеперечисленных геометрических параметров были приняты величины  $\pm 2$  мм и град. от исходного размера, кроме воздушного зазора (0,15...0,3) и  $b2s$  (0...10 град.).

Массивы данных, требующиеся для построения данной корреляционной зависимости, были получены с применением алгоритма оптимизации на основе метода Монте-Карло, реализованного в программном продукте, созданном для автоматизации и оптимизации проектирования активной части ВИМ [13]. Выбор метода Монте-Карло был сделан по причине его отличия от других методов простотой и общностью, а также его гарантией нахождения глобального экстремума. Недостатком данного метода является медленная сходимость, однако указанный недостаток можно частично исключить посредством модификации метода [14–17]. Распределение случайной величины было принято при равномерной плотности вероятности. Оптимизационный алгоритм и обработка результатов полевых расчетов осуществлялись посредством пакета прикладных программ MATLAB, которая в свою очередь для моделирования и вычисления магнитных полей непосредственно взаимодействовала с программой FEMM 4.2 [18–20].

Объем выборки после проведенных расчетов для каждого случая в среднем состоял из 150 значений. В результате чего были построены диаграммы рассеяния и функции регрессии, которые представлены на соответствующих рисунках. Построенные графики разброса позволяют наглядно увидеть характер связи между переменными. На каждом рисунке выведены линейные уравнения регрессии и их величины достоверности аппроксимации  $R^2$  (коэффициент детерминации). На некоторых рисунках также представлены альтернативные уравнения, носящие полиномиальный характер, вследствие того, что при рассматриваемых распределениях коэффициент детерминации линейной функции регрессии принимал меньшее значение. Рассмотрению подлежали все имеющиеся в программе Excel варианты линий тренда (экспоненциальной, логарифмической, степенной), однако значения  $R^2$  при их использовании отличались от линейной функции не более чем на 2 %, поэтому их дальнейшее рассмотрение и применение нецелесообразно.

В качестве первой рассматриваемой зависимости выступила функция с такими переменными, как радиус расточки статора и среднее значение электромагнитного момента (рис. 2). При

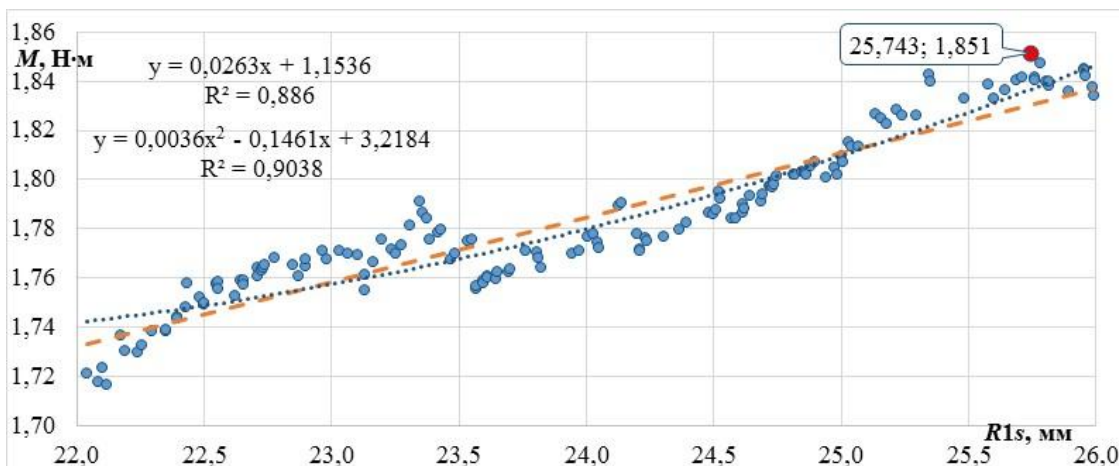


Рис. 2. График корреляционной связи электромагнитного момента ( $M$ ) и радиуса расточки статора ( $R1s$ )

этом величина воздушного зазора оставалась неизменной.

На всех исследуемых графиках штриховой линией оранжевого цвета изображена линия регрессии, носящая линейный характер, а точечной линией синего цвета – полиномиальная линия тренда. Также на каждой диаграмме рассеяния красным цветом выделена координата с наибольшим значением переменной  $M$ .

Из полученного графика корреляционной связи переменных  $M$  и  $R1s$  видно, что коэффициент  $R^2$  при линейной функции регрессии принимает значение, равное 0,886, или 88,6 %, а при полиномиальной – 90,4 %. Поскольку данной зависимости присущи участки возрастания и убывания, поэтому коэффициент детерминации для полиномиальной линии регрессии принимает наибольшее значение. Величина  $R^2$  в данном случае показывает, что 90,4 % вариаций значений  $M$  (электромагнитного момента) объясняются изменением параметра  $R1s$  (радиуса расточки статора), а 9,6 % – воздействием не рассматриваемых факторов. Величина достоверности аппроксимации, принимающая значение 90,4 %, говорит о хорошем качестве постро-

енной модели, т. е. о ее высокой степени достоверности и минимальной доли погрешностей.

Рассматриваемую корреляционную зависимость также можно проверить на наличие линейной связи с помощью сравнения значения коэффициента корреляции  $r$  и коэффициента детерминации  $R^2$ . Для рассматриваемой зависимости величин коэффициент корреляции принимает значение, равное 0,94, возведя данное значение в квадрат, получим  $R^2 = 0,883$ . Равенство данного числа, полученного расчетным путем, и значения  $R^2$  для линейного уравнения, изображенного на графике (см. рис. 2), характеризуют наличие линейной зависимости, а величина  $r$  говорит о «прямой», положительной и тесной (сильной) связи. Максимальное среднее значение электромагнитный момент принимает при  $R1s = 25,74$  мм, что превышает исходный (24 мм) на 6,76 %.

Вторым исследуемым набором данных были численные значения переменных  $M$  от значений ширины зубца статора (рис. 3).

Коэффициент детерминации парной корреляции двух факторов  $M$  и  $b1s$  при линейном характере линии регрессии равен 89,3 %, а при полино-

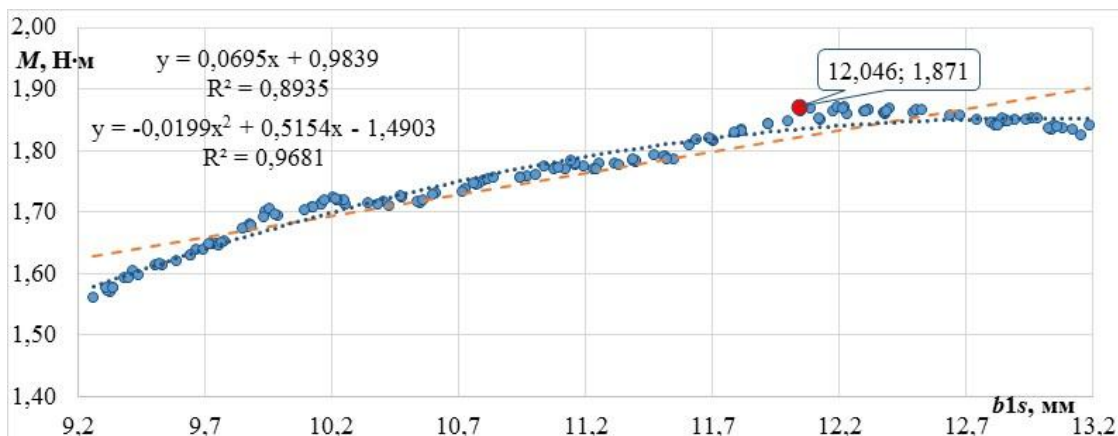


Рис. 3. График корреляционной связи электромагнитного момента ( $M$ ) и радиуса ширины зубца статора ( $b1s$ )

## Электромеханические системы

миальном – 96,8 %. Данное поле корреляции так же, как и в первом случае, имеет некоторый разброс координат от прямой линии, что свидетельствует о приоритетном использовании модели, основанной на полиномиальной регрессии. Коэффициент корреляции принимает значение, равное 0,94, и говорит о положительной, сильной связи между исследуемыми переменными. Как видно из данной картины распределения переменных, максимальное значение момента достигается при ширине зубца статора 12,046 мм. Указанная величина превышает размер, предусмотренный исходной конструкцией (11,2 мм), на 7 %.

Графическая взаимосвязь конструктивного элемента магнитной системы – наклона боковой поверхности зубца статора – и электромагнитного момента изображена на рис. 4. Значение максимума момента получено на границе расчетной области варьируемого параметра  $b2s$ . Согласно первоначальной конструкции исследуемого объекта, наклон боковой поверхности зубца статора составлял 0 град. После проведения оптимизационного расчета величина данного конструктивного элемента составила 10 град.

Величина достоверности аппроксимации для нелинейной зависимости электромагнитного момента ( $M$ ) от угла наклона боковой поверхности зубца статора ( $b2s$ ) и в этом случае максимальна для уравнения кривой линии полиномиальной регрессии. Коэффициент корреляции для данного массива данных принимает значение, равное  $r = 0,915$ , и говорит о том, что данную связь можно характеризовать как «прямую» и тесную (сильную).

Следующим и последним геометрическим параметром статора в зависимости от значения момента был рассмотрен  $R2s$  (радиус статора по пазам, мм) (рис. 5). Как и в вышерассмотренном случае, максимальное среднее значение момента равно размеру радиуса статора по пазам, граничащего с принятыми числовыми ограничениями. Однако для данного случая оптимальная точка сдвинулась в сторону уменьшения от первоначального размера. В исходном варианте  $R2s = 35,5$  мм, а после проведения оптимизационного расчета – 33,5 мм.

Представленная корреляционная связь имеет значения коэффициентов детерминации при линейной и полиномиальной функциях практически

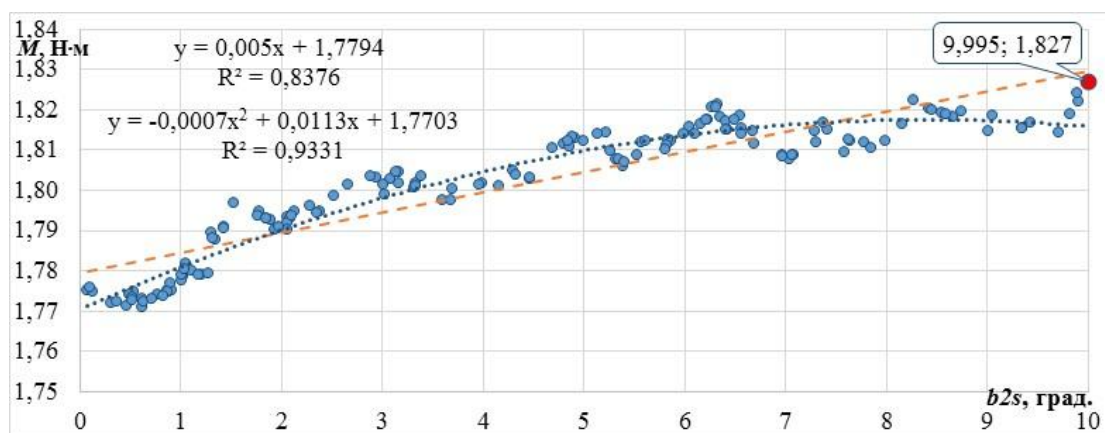


Рис. 4. График корреляционной связи электромагнитного момента ( $M$ ) и наклона боковой поверхности зубца статора ( $b2s$ )

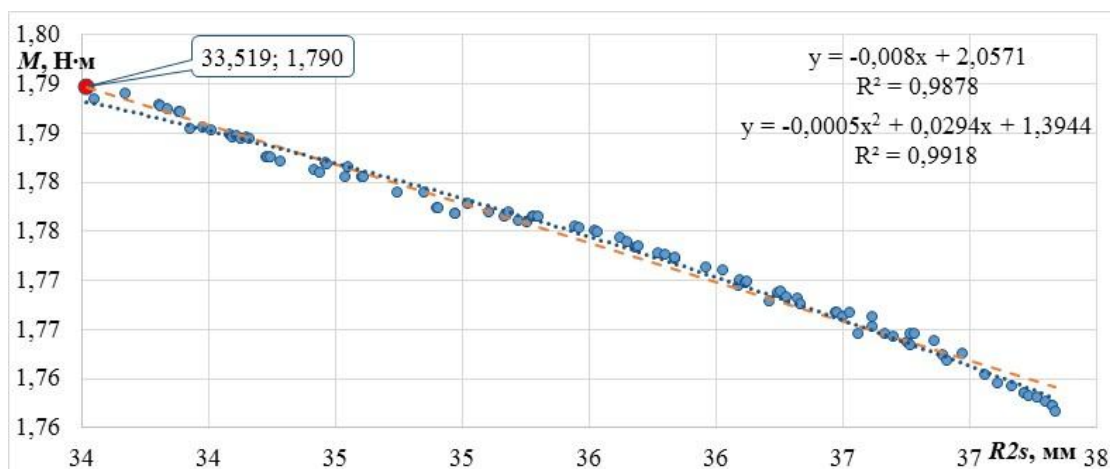


Рис. 5. График корреляционной связи электромагнитного момента ( $M$ ) и радиуса статора по пазам ( $R2s$ )

идентичные (98 и 99 %), отличающиеся лишь друг от друга на 1 %. Коэффициент корреляции для зависимости наблюдаемых переменных принимает отрицательное значение, равное  $r = -0,99$ . Так как в данном случае величина  $R^2$  для линейной функции регрессии достаточно высока, то с большой долей вероятности можно рассматривать данную зависимость как линейную, а коэффициент корреляции, который используется только для линейных связей, говорит об «обратной», отрицательной и очень сильной, практически функциональной связи.

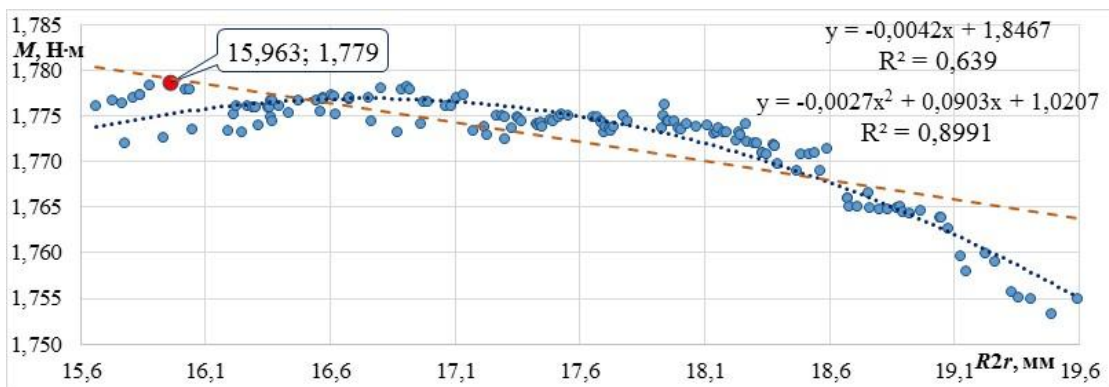
Исходя из полученных результатов после исследования корреляционных зависимостей между средним значением момента и геометрическими размерами зубцовой зоны статора, можно сделать вывод, что пути для прохождения магнитного потока стали шире. Данное конструктивное изменение приведет к падению магнитного сопротивления всей магнитной цепи и степени насыщения машины.

Далее рассмотрению подлежали геометрические параметры ротора (рис. 6), и первой исследуемой статистической зависимостью являлась совокупность переменных  $R2r$  (радиус ротора по пазам, мм) и  $M$  (рис. 6а).

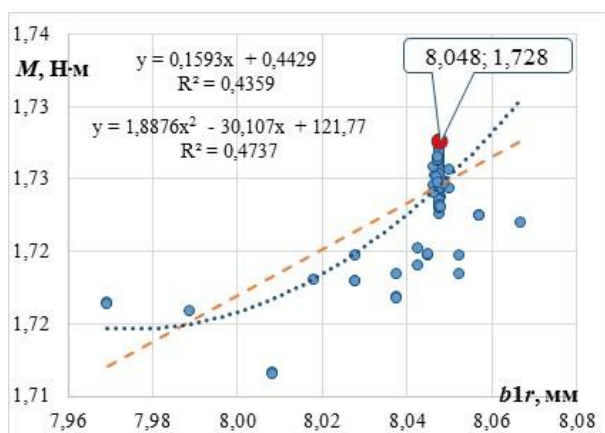
Качество регрессионной модели для графически представленного распределения наблюдаемых параметров лучше практически на 30 % при ис-

пользовании полиномиальной линии тренда. Значение коэффициента детерминации  $R^2 = 0,89$  можно интерпретировать следующим образом: 90 % дисперсии результирующего фактора ( $M$ ) объясняется данным уравнением регрессии, а оставшаяся часть, которая составляет 10 %, – прочими факторами дисперсии. Для такой величины  $R^2$  доля объясненной вариации  $R2r$  достаточно высока и построенная модель регрессии с высокой степенью вероятности обладает хорошими аппроксимирующими свойствами. При рассмотрении данной связи как линейной можно сказать, что направление корреляционной зависимости носит отрицательный характер ( $r = -0,79$ ), а тесноту взаимодействия переменных можно определить как сильную, но достаточно близкую к умеренной. Наибольшее значение электромагнитного момента наблюдается при величине радиуса ротора по пазам, равной 15,96 мм (меньше исходной на 1,64 мм), что говорит о таком конструктивном изменении, как сужение ярма ротора.

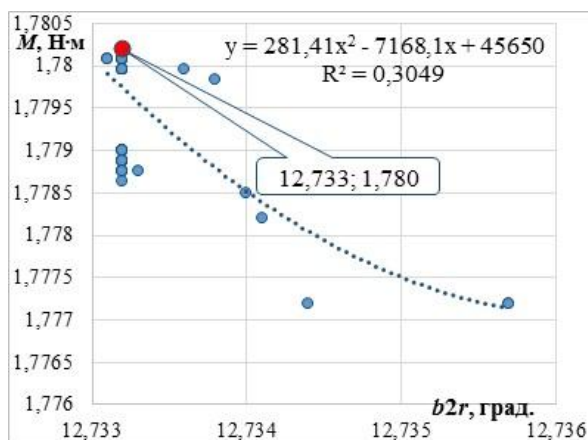
Для зависимости величин  $M$  от  $b1r$  (ширина коронки зубца ротора) (рис. 6б) коэффициент детерминации максимален также для полиномиального уравнения регрессии, однако разница между другими значениями не превышает 8,5 %. В данном случае величина  $R^2 = 0,47$  говорит о постро-



а)



б)



в)

Рис. 6. График корреляционной связи электромагнитного момента ( $M$ ) и радиуса ротора по пазам ( $R2r$ ) (а), ширины коронки зубца ротора ( $b1r$ ) (б) и наклона боковой поверхности зубца ротора ( $b2r$ ) (в)



енной модели плохого качества и не может быть использована для дальнейшего прогнозирования. Коэффициент корреляции равен 0,66, что свидетельствует о «прямой», положительной и средней (умеренной) связи. Максимум среднего значения электромагнитного момента достигнут в точке с координатой  $b1r = 8,05$  мм. Разница между исходной и полученной после расчетов составляет 0,45 мм. Произошло незначительное уменьшение ширины коронки зубца ротора.

Величина достоверности аппроксимации для зависимости электромагнитного момента ( $M$ ) от угла наклона боковой поверхности зубца ротора ( $b2r$ ) (рис. 6в) принимает достаточно низкое значение. Она показывает всего 30 % вариаций значений  $M$ , обусловленной изменчивостью размеров  $b2r$ . Коэффициент корреляции для данного массива данных принимает значение, равное  $r = -0,544$ . Указанное значение коэффициента говорит о слабой и отрицательной линейной связи.

Согласно полученным результатам числовых значений элементов зубцовой зоны ротора видно, что высота зуба ротора была увеличена, а ширина коронки зубца – незначительно стала меньше. Данное явление свидетельствует об увеличении разницы между индуктивностью фазы в согласованном положении ротора и индуктивностью фазы в рассогласованном положении. Именно разница в индуктивностях во многом определяет энергетические показатели электрической машины вентильно-индукторного типа.

Последним рассматриваемым корреляционным полем было распределение, состоящее из переменных электромагнитного момента ( $M$ ) и величины воздушного зазора ( $\delta$ ) (рис. 7).

Максимальное значение величины  $R^2$  равно 0,9994 при линейном характере регрессионной линии. Значение 99,9 % говорит о наличии функциональной зависимости, т. е. что 99,9 % изменений первой переменной ( $M$ ) вызваны вариациями второй переменной ( $\delta$ ). Линейное уравнение регрессии с достаточной точностью описывают зависимость этих переменных. Качество модели с та-

кой величиной  $R^2$  является хорошим и может использоваться в дальнейшем для прогноза значений результирующего показателя. Величина коэффициента корреляции ( $r = -0,9997$ ) свидетельствует о линейной функциональной зависимости, при которой все значения исследуемых переменных расположены почти на одной прямой. Связи между  $M$  и  $\delta$  можно определить как отрицательную и практически функциональную (очень сильную). Максимум момента достигается при значении воздушного зазора, равного 0,173 мм, что меньше первоначальной на 0,027 мм (от  $\delta = 0,2$  мм). Уменьшение величины  $\delta$  носит закономерный характер, поскольку значение электромагнитного момента обратно пропорционально значению воздушного зазора. Однако создание ВИД с очень малой величиной воздушного зазора приведет к технологическим трудностям и проблемам в дальнейшей эксплуатации (например, увеличение степени неравномерности воздушного зазора под разными полюсами).

Для наглядного представления изменений, которые претерпели рассмотренные геометрические фрагменты, на рис. 8 изображены столбиковые диаграммы. Оранжевым цветом окрашены столбцы, отражающие исходные значения в абсолютном выражении, а синим цветом – значения конструктивных элементов, полученные после расчетов в абсолютном выражении с процентным изменением.

На рис. 9 представлена систематизированная картина в виде линейчатой гистограммы полученных результатов расчетов среднего значения электромагнитного момента в процессе данного исследования.

Как упоминалось в начале статьи, номинальное (исходное) значение момента для рассматриваемого объекта ВИД 6/6 составляет 1,49 Н·м. Процентное изменение (прирост), полученное после итерационных расчетов, проводимых с каждым геометрическим фрагментом, вынесено в соответствующие столбцы оранжевого цвета. Представленная диаграмма позволяет увидеть изменения численной и процентной величины момента,

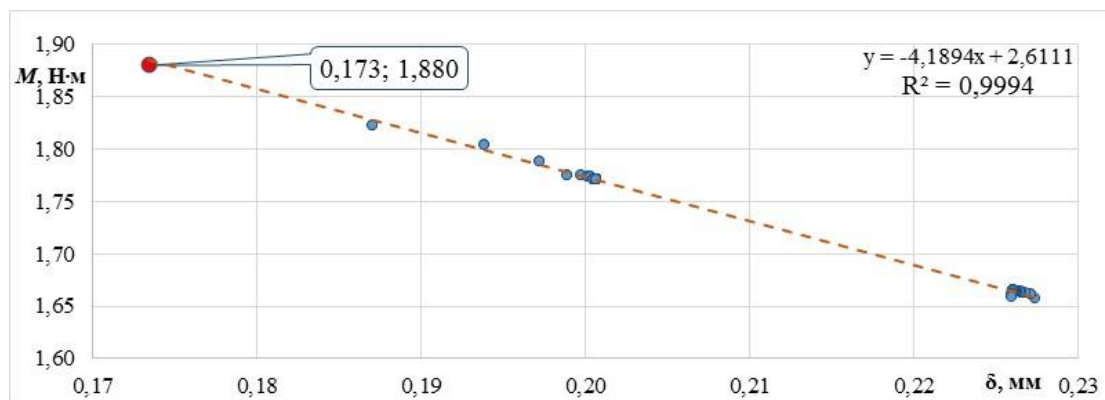


Рис. 7. График корреляционной связи электромагнитного момента ( $M$ ) и воздушного зазора ( $\delta$ )

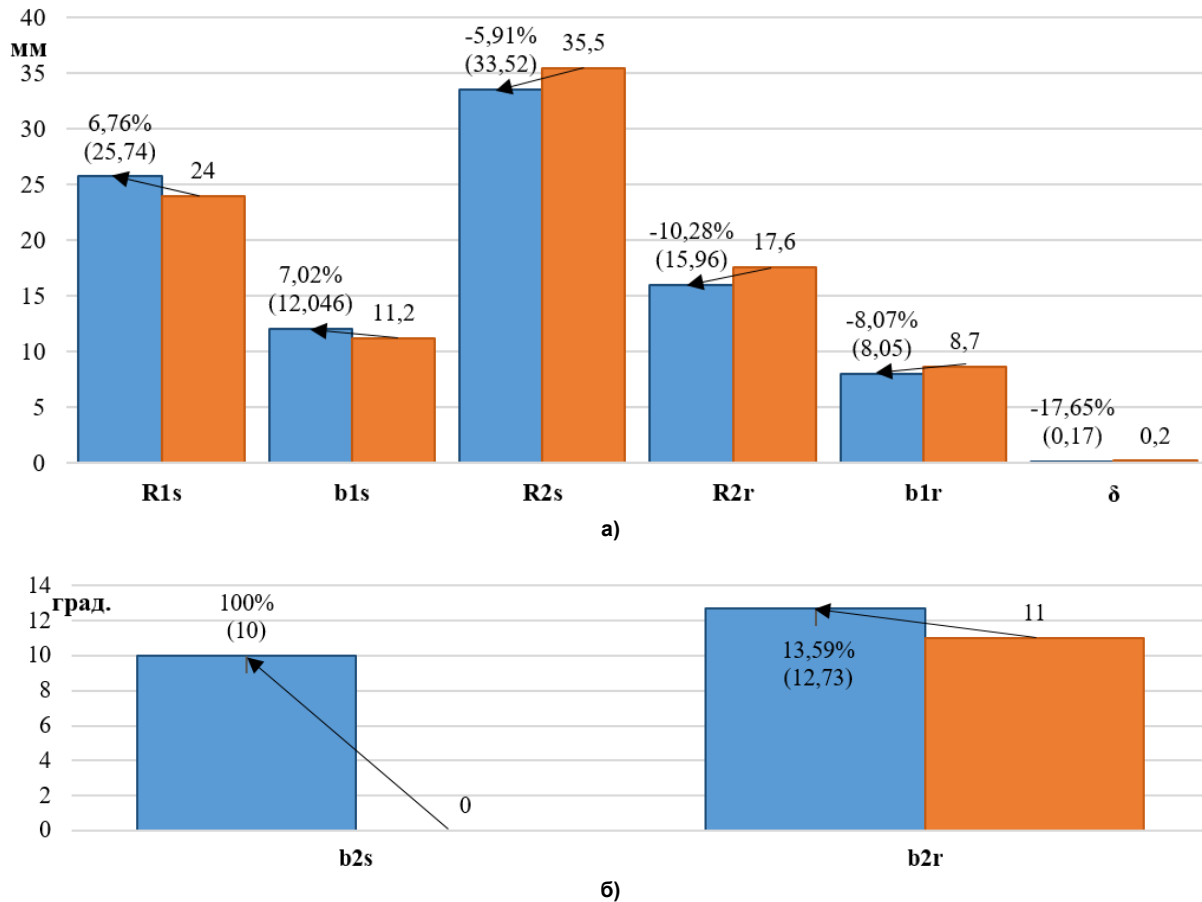


Рис. 8. Динамика изменения исследуемых геометрических размеров

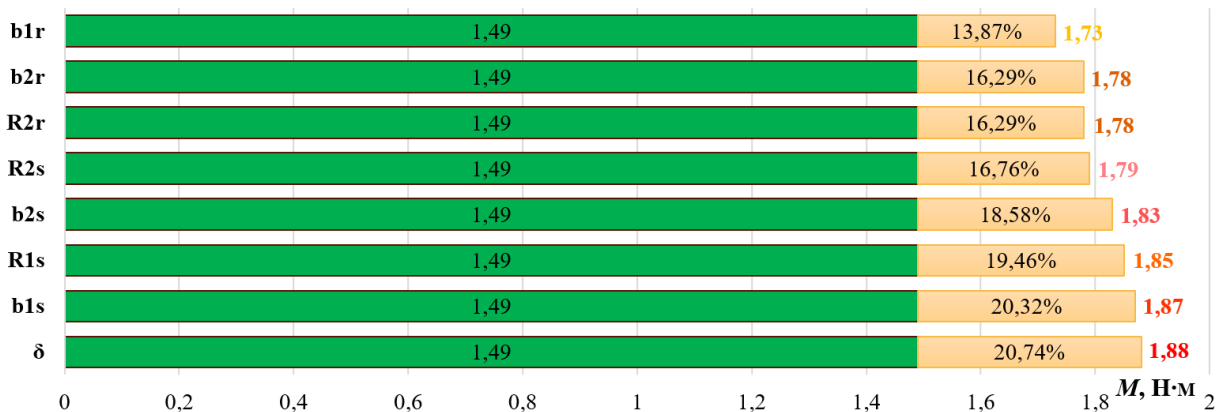


Рис. 9. Результаты расчетов среднего значения электромагнитного момента

а также сравнить вклад каждого исследуемого конструктивного размера активной части магнитной системы на формирование его среднего значения. Геометрические элементы расположены в порядке снижения степени влияния на величину момента. Проведя анализ полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Наибольшее влияние на формирование значения момента оказывает величина воздушного зазора и элементы зубцовой зоны статора. Отображенная информация на рис. 8 показывает, что

исследуемые по отдельности размеры статора были увеличены. Расширение зоны для прохождения магнитного потока создает возможность получения большего значения момента. Уменьшение величины воздушного зазора ведет к снижению значения фазного тока и, как следствие, к повышению энергетических характеристик.

2. Элементы зубцовой зоны ротора оказывают в меньшей степени влияние на значение момента. Однако даже минимальный прирост величины  $M$  составил 13,87 %. При увеличенной высоте зубца

ротора разница между индуктивностями активной фазы в согласованном и рассогласованном положениях стала больше, а ведь именно разница в индуктивностях и является во многом определяющей в получении максимального значения момента.

Для создания ВИД, обладающего высокими энергетическими показателями, в частности высоким значением электромагнитного момента, необходимо проводить комплексную оптимизацию геометрических параметров статора и ротора. В свою очередь, программа FEMM позволяет учесть особенности расчета электрических машин данного типа. Эта программа гарантирует согласованность противоречащих друг другу требований при достижении экстремума целевой функции, напри-

мер, максимума среднего значения электромагнитного момента.

### Выводы

Использование корреляционного анализа позволило определить силу и направление взаимосвязи между исследуемыми конструктивными элементами активной части ВИД 6/6 и среднего значения электромагнитного момента. По результатам проведенного анализа можно судить о существовании соответствующей корреляции указанных параметров.

Результаты расчетов среднего значения электромагнитного момента при варьировании отдельного конструктивного размера позволили увидеть степень влияния каждого параметра магнитной системы на формирование значения момента.

### Литература

1. Петрушин, А.Д. Снижение пульсаций электромагнитного момента тягового вентиляльно-индукторного привода с фазовым перекрытием в 90 электрических градусов / А.Д. Петрушин, А.Р. Шайхиев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2004. – № 3. – С. 111–113.
2. Птах, Г.К. Вентиляльно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт / Г.К. Птах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2, № 3. – С. 23–33. DOI: 10.24892/rijee/20150305
3. Королев, В.В. Вентиляльно-индукторные электромеханические преобразователи в современном автомобиле / В.В. Королев // Междунар. науч.-техн. конф. ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». – М.: МГТУ «МАМИ», 2010. – Т. 3. – С. 46–54.
4. Вентиляльно-индукторный электропривод троллейбуса / В.Л. Коломейцев, С.А. Пахомин, Д.В. Крайнов [и др.] // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск, 2014. – Т. 2. – С. 200–205.
5. Kocan, S. Dynamic Model of High Speed Switched Reluctance Motor for Automotive Applications / S. Kocan, P. Rafajdus // 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport (TRANSCOM 2019), Slovak Republic. – 2019. – Vol. 40. – P. 302–309. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.045
6. Карнаухов, Н.Ф. Математическая модель вентиляльно-реактивного двигателя мехатронной системы при одноимпульсном питании / Н.Ф. Карнаухов, Г.В. Дзяян, Н.В. Русин // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-21): сб. тр. XXI междунар. науч. конф. – Саратов, 2008. – Т. 7. – С. 25–27.
7. Шевкунова, А.В. Проектирование вентиляльно-индукторного двигателя как узла системы регулируемого привода с применением алгоритмов оптимизации / А.В. Шевкунова // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Т. 8, № 4. – <http://naukovedenie.ru/PDF/47TVN416.pdf> (дата обращения: 21.05.2020).
8. Usman Jamil, M. Average Torque Control of a Switched Reluctance Motor Drive for Light Electric Vehicle Applications / M. Usman Jamil, W. Kongprawechnon, N. Chayopitak // 20th IFAC World Congress. – 2017. – Vol. 50, no. 1. – P. 11535–11540. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1628
9. Brumercikova, E. The Regression and Correlation Analysis of Carried Persons by Means of Public Passenger Transport of the Slovak Republic / E. Brumercikova, B. Bukova // LOGI 2019 – Horizons of Autonomous Mobility in Europe, Slovakia. – 2020. – Vol. 44 – P. 61–68. DOI:10.1016/j.trpro.2020.02.010
10. Altman, M. A More Scientific Approach to Applied Economics: Reconstructing Statistical, Analytical Significance, and Correlation Analysis / M. Altman // Economic Analysis and Policy. – 2020. – Vol. 66. – P. 315–324. DOI: 10.1016/j.eap.2020.05.006
11. Неуймин, В.Г. Верификация модели обвязки схемы и идентификация грубых ошибок данных телеметрии в ПК «RASTRWIN3» / В.Г. Неуймин, П.М. Ерохин, Д.М. Максименко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 24–29. DOI: 10.14529/power160104
12. Zhou, Y. The Optimal Rate of Canonical Correlation Analysis for Stochastic Processes / Y. Zhou, D.-R. Chen // Journal of Statistical Planning and Inference. – 2020. – Vol. 207. – P. 276–287. DOI: 10.1016/j.jspi.2020.01.003
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618039 Российская Федерация. Оптимизация ВИМ / А.Д. Петрушин, А.В. Кацуба, А.В. Шевкунова. – Заявка № 2016615739; дата поступления 30.05.2016; дата регистрации 20.07.2016.



14. Petrushin, A.D. *Dynamic Optimization of Switched-Reluctance Motors* / A.D. Petrushin, A.V. Kashuba // *Russian Engineering Research*. – 2018. – Vol. 38, no. 9. – P. 705–706. DOI: 10.3103/S1068798X1809023X
15. Кашуба, А.В. *Оптимизационный метод формирования геометрических размеров зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя* / А.В. Кашуба // *Транспортные системы и технологии*. – 2020. – Т. 5, № 1. – С. 30–47. DOI: 10.17816/transsyst20195100-00
16. Dufek, J. *Optimal Time Step Length and Statistics in Monte Carlo Burnup Simulations* / J. Dufek, I. Mikus // *Annals of Nuclear Energy*. – 2020. – Vol. 139. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.107244
17. Tian, C. *Mathematical Modeling of Security Impact Analysis of Communication Network Based on Monte Carlo Algorithm* / C. Tian, X. Hu // *Computer Communications*. – 2020. – Vol. 157. – P. 20–27. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.04.005
18. Jentzscha, E. *A Comprehensive Electric Field Analysis of a Multifunctional Electrospinning Platform* / E. Jentzscha, Ö. Gülb, E. Öznegiz // *Journal of Electrostatics*. – 2013. – Vol. 71, no. 3. – P. 294–298. DOI: 10.1016/j.elstat.2012.12.007
19. Кашуба, А.В. *Особенности компьютерного моделирования электромагнитных процессов в вентильно-индукторном двигателе* / А.В. Кашуба // *Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2017)*. – Ростов н/Д., 2017. – С. 145–149.
20. Hitoshi Takinami, A. *Design, Simulation and Development of a Magnetic Levitation System (MAGLEV)* / A. Hitoshi Takinami, R. Borges Cruz Bruno, L. Soaresde Lima // *Results in Physics*. – 2020. DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103115

**Петрушин Александр Дмитриевич**, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Тяговый подвижной состав», Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону; alex331685@yandex.ru.

**Шевкунова Анастасия Владимировна**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Тяговый подвижной состав», Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону; nastya3051990@mail.ru.

**Смачный Владислав Юрьевич**, начальник отдела трудоустройства и мониторинга карьеры, Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону; Smachney87@mail.ru.

Поступила в редакцию 28 мая 2020 г.

DOI: 10.14529/power200212

## ELECTROMAGNETIC TORQUE OF SWITCHED-RELUCTANCE MOTORS AND ITS CORRELATION WITH THE MAGNETIC SYSTEM GEOMETRY

**A.D. Petrushin**, alex331685@yandex.ru,  
**A.V. Shevkunova**, nastya3051990@mail.ru,  
**V.Yu. Smachnyy**, Smachney87@mail.ru

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

A switched-reluctance machine, being the primary component of a switched-reluctance drive, is a promising yet understudied electromechanical energy converter. Any industry can potentially expand its use of these machines. Creating a globally competitive, high-performance, and cost-effective switched-reluctance drive requires scientifically solid data on how the geometric variables of the magnetic system correlate with, and affect, the average electromagnetic torque. The goal hereof is to find how strongly this average value correlates with the geometric variables of the active machine components, and whether this correlation is positive or negative. Correlation analysis identified how strongly the structural parameters under consideration affected the average electromagnetic torque. The numerical value of the latter was calculated in MATLAB interfacing with the magnetic field calculation and visualization software FEMM 4.2. A Monte Carlo algorithm-based stochastic

method was applied to find the numerical values of torque. Research effort described herein does demonstrate a correlation between the structural elements of the magnetic system and the values of the electromagnetic torque; it also shows the strength of such correlation.

*Keywords:* switched-reluctance drive, active part, geometric dimensions, electromagnetic torque, correlation analysis, dependence, determination coefficient.

### References

1. Petrushin A.D., Shaykhiev A.R. [Reducing the Pulsation of the Electromagnetic Moment of the Traction Switched-Reluctance Drive with a Phase Overlap of 90 Electrical Degrees]. *Vestnik RGUPS*, 2004, no. 3, pp. 111–113. (in Russ.)
2. Ptakh G.K. [Switched-Reluctance Reactive Electric Drive of Medium and High Power: Foreign and Domestic Experience]. *Electrical Engineering: Online Electronic Scientific Journal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no. 3, pp. 23–33 (in Russ.) DOI: 10.24892/rijee/20150305
3. Korolev V.V. [Switched-Reluctance Electromechanical Converters in a Modern Car]. *Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. AAI "Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: priority razvitiya i podgotovka kadrov"* [International Scientific-Technical Conf. AAI "Automobile and Tractor Construction in Russia: Development Priorities and Training"]. Moscow, MSTU "MAMI" Publ., 2010, vol. 3, pp. 46–54. (in Russ.)
4. Kolomeyev V.L., Pakhomin S.A., Kraynov D.V., Pakhomin L.S., Prokopets A.I., Rednov F.A. [Switched-Reluctance Electric Drive of the Trolleybus]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektropivodu AEP-2014* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AEP-2014]. Saransk, 2014, vol. 2, pp. 200–205. (in Russ.)
5. Kocan S., Rafajdus P. Dynamic Model of High Speed Switched Reluctance Motor for Automotive Applications. *13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport (TRANSCOM 2019)*, Slovak Republic, 2019, vol. 40, pp. 302–309. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.045
6. Karnaukhov N.F., Dzayan G.V., Rusin N.V. [Mathematical Model of a Mechatronic System's Switched -Jet Engine with Single-Pulse Power Supply]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh (MMTT-21): sb. tr. XXI mezhdunar. nauch. konf.* [Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMTT-21)]. Saratov, 2008, vol. 7, pp. 25–27. (in Russ.)
7. Shevkunova A.V. [Design of a Switched-Reluctance Motor as a Unit of a Controlled Drive System Using Optimization Algorithms]. *Internet-journal Science of Science*, 2016, vol. 8, no. 4. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/47TVN416.pdf> (accessed 21.05.2020). (in Russ.)
8. Usman Jamil M., Kongprawechon W., Chayopitak N. Average Torque Control of a Switched Reluctance Motor Drive for Light Electric Vehicle Applications. *20th IFAC World Congress*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 11535–11540. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1628
9. Brumercikova E., Bukova B. The Regression and Correlation Analysis of Carried Persons by Means of Public Passenger Transport of the Slovak Republic. *LOGI 2019 – Horizons of Autonomous Mobility in Europe*, Slovakia, 2020, vol. 44, pp. 61–68. DOI:10.1016/j.trpro.2020.02.010
10. Altman M. A More Scientific Approach to Applied Economics: Reconstructing Statistical, Analytical Significance, and Correlation Analysis. *Economic Analysis and Policy*, 2020, vol. 66, pp. 315–324. DOI: 10.1016/j.eap.2020.05.006
11. Neuymin V.G., Erokhin P.M., Maksimenko D.M. [Verification of the Circuit Binding Model and Identification of Gross Errors in Telemetry Data in PC "RASTRWIN3"]. *Bulletin of the South Ural State University, Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 24–29. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160104
12. Zhou Y., Chen D.-R. The Optimal Rate of Canonical Correlation Analysis for Stochastic Processes. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2020, vol. 207, pp. 276–287. DOI: 10.1016/j.jspi.2020.01.003
13. Petrushin A.D., Kashuba A.V., Shevkunova A.V. *Optimizatsiya VIM* [Optimization of SRM]. Computer Program, no. 2016618039, 2016.
14. Petrushin A.D., Kashuba A.V. Dynamic Optimization of Switched-Reluctance Motors. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 9, pp. 705–706. DOI: 10.3103/S1068798X1809023X
15. Kashuba A.V. [Optimization Method for Forming Geometric Dimensions of the Tooth Zone of a Switched Reluctance motor]. *Transportation Systems and Technology*, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 30–47. (in Russ.) DOI: 10.17816/transsyst20195100-00
16. Dufek J., Mickus I. Optimal Time Step Length and Statistics in Monte Carlo Burnup Simulations. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, vol. 139. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.107244
17. Tian C., Hu X. Mathematical Modeling of Security Impact Analysis of Communication Network Based on Monte Carlo Algorithm. *Computer Communications*, 2020, vol. 157, pp. 20–27. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.04.005

18. Jentzscha E., Gülb Ö., Öznergiz E. A Comprehensive Electric Field Analysis of a Multifunctional Electrospinning Platform. *Journal of Electrostatics*, 2013, vol. 71, no. 3, pp. 294–298. DOI: 10.1016/j.elstat.2012.12.007

19. Kashuba A.V. [Features of Computer Simulation of Electromagnetic Processes in a Switched Reluctance Motor]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo (Transport-2017)* [Transport: Science, Education, Production (Transport-2017)]. Rostov-on-Don, 2017, pp. 145–149. (in Russ.)

20. Hitoshi Takinami A., Borges Cruz Bruno R., Soaresde Lima L. Design, Simulation and Development of a Magnetic Levitation System (MAGLEV). *Results in Physics*, 2020. DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103115

Received 28 May 2020

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Петрушин, А.Д. Исследование взаимосвязи электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя и геометрических элементов его магнитной системы / А.Д. Петрушин, А.В. Шевкунова, В.Ю. Смачный // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 127–137. DOI: 10.14529/power200212

#### FOR CITATION

Petrushin A.D., Shevkunova A.V., Smachnyy V.Yu. Electromagnetic Torque of Switched-Reluctance Motors and Its Correlation with the Magnetic System Geometry. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 127–137. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200212

---