

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ И ИНДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А.Н. Горожанкин, gorozhankinan@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8748-4700>

А.В. Коржов, korzhovav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8504-9668>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача поиска наилучших размеров элементов магнитных систем синхронных реактивных и индукторных электрических машин в расширенном диапазоне изменения момента нагрузки и мощности. Предложен алгоритм решения поставленной задачи, который предполагает разделение элементов магнитной системы на две группы. Первая группа влияет на величину пульсаций момента, а вторая не влияет на этот показатель. Такое разбиение ускоряет процесс сходимости результата. Предложен метод последовательного нелинейного программирования для решения поставленной задачи. Он обладает хорошей сходимостью при минимальном времени поиска. Выполнен синтез конечно-элементных моделей синхронной реактивной машины с зубчатым и анизотропным типами ротора, вентильно-индукторной машины, машины с переключением поля, синхронной реактивной и индукторной машин с двухсторонней зубчатостью. Показано, что доля обмоточной меди относительно стали в активной части машин возрастает относительно машин традиционного исполнения при работе в номинальном режиме. Напротив, эта особенность проявляется в меньшей степени при работе в зоне перегрузок по моменту. С увеличением мощности возрастают электромагнитные нагрузки, что эквивалентно работе машины меньшей мощности в режиме перегрузки. Показано, что чувствительность к величине воздушного зазора у машин с двухсторонней зубчатостью и распределенной обмоткой на статоре самая большая в исследуемом классе, поэтому с возрастанием мощности удельный момент будет существенно увеличиваться. Напротив, наименьшая чувствительность к величине воздушного зазора у машин с односторонней зубчатостью и распределенной обмоткой на статоре позволяет выполнять эти машины с большей величиной зазора без ущерба для удельного момента.

Ключевые слова: синхронная реактивная машина, конечно-элементный анализ, особенности синтеза, удельный момент, воздушный зазор

Для цитирования: Горожанкин А.Н., Коржов А.В. Особенности синтеза синхронных реактивных и индукторных электрических машин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 2. С. 81–91. DOI: 10.14529/power220208

Original article
DOI: 10.14529/power220208

FEATURES OF SYNTHESIS OF SYNCHRONOUS RELUCTANCE AND INDUCTOR ELECTRIC MACHINES

A.N. Gorozhankin, gorozhankinan@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8748-4700>

A.V. Korzhov, korzhovav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8504-9668>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The problem of finding the best dimensions for the elements of magnetic systems of synchronous reluctance and inductor electric machines in an extended range of changes in load torque and power is considered. An algorithm for solving the problem is also proposed, involving the division of the elements of the magnetic system into two groups. The first group affects the magnitude of the torque pulsations, while the second does not affect this indicator. Such partitioning accelerates the process of convergence of the result. A method of sequential non-linear programming is proposed for resolving the problem. It has good convergence with minimal search time. Synthesis of finite element models of a synchronous reluctance machine with salient pole and anisotropic types of rotors, switched reluctance machine (SRD), machine with field switching (FSDC), Vernier reluctance and double field Vernier reluctance machines was performed. It was shown that the proportion of winding copper relative to steel in the active part of the machines increases relative to conventional machines when operating in the nominal mode. On the contrary, this feature was manifested to a lesser extent when working in the zone of overloads in terms of torque. Electromagnetic loads increase with increasing power, equivalent to operating a machine of lower power in overload mode. It was shown that the sensitivity to the size of the air gap in Vernier reluctance machines is the highest in the class under study. Thus, with increasing

power, the specific torque will increase significantly. On the contrary, the lowest sensitivity to the air gap value in machines with one-sided gearing and distributed winding on the stator allows these machines to be made with a larger gap without compromising the specific torque.

Keywords: synchronous reluctance machine, finite element analysis, synthesis features, specific torque, air gap

For citation: Gorozhankin A.N., Korzhov A.V. Features of synthesis of synchronous reluctance and inductor electric machines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(2):81–91. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220208

Введение

Модернизация производства приводит к возрастанию требований по энергоэффективности электрических машин, расширяются диапазоны изменения скоростей и моментов рабочих механизмов. Усиливаются требования к снижению материалоемкости и в конечном счете к себестоимости электрической машины. В связи с этим, а также благодаря развитию силовой, информационной электроники, информационного обеспечения наиболее перспективными для металлургической промышленности, тягового электропривода, нефтегазовой сферы являются синхронные реактивные и индукторные электрические машины. Оптимизация таких машин выполняется, как правило, в номинальном режиме работы, не учитываются особенности синтеза в широком диапазоне изменения мощности. В связи с этим выявление особенностей синтеза синхронных реактивных и индукторных электромеханических преобразователей в зависимости от мощности и диапазона изменения момента является актуальной задачей.

Обзор литературы

Оптимизации синхронных реактивных машин с анизотропным ротором (СРМСАР) в номинальном режиме работы посвящены научные труды [1–6]. В них получены результаты по различным вариантам геометрии магнитной системы роторов. Радиальная геометрия синхронной реактивной машины с зубчатым ротором (СРМСЗР), работающей в составе регулируемого электропривода и питающейся от несинусоидальных источников тока, оптимизировалась в [7, 8]. Расчет выполнялся в номинальной точке и в ограниченном диапазоне мощностей от 1 до 100 кВт. Оптимизация синхронных реактивных и индукторных машин с двухсторонней зубчатостью и распределенными обмотками на статоре (СРМСДЗ и ИМСДЗ) в номинальном режиме выполнялась в работах [9–11]. Синтезу вентильно-индукторных машин с самовозбуждением (ВИМ) в отдельных режимах работы посвящены работы [12–17]. Исследованию динамических режимов и синтезу вентильно-индукторных машин с независимым возбуждением (в англоязычной терминологии *Flux Switching DC – FSDC*) в номинальной точке посвящены работы [18–22].

Таким образом, в научных работах не выявлены особенности синтеза синхронных реактивных и индукторных электрических машин в широком

диапазоне изменения момента нагрузки и большом диапазоне мощностей.

Постановка задачи, метод и алгоритм синтеза геометрии радиального сечения

Синтез геометрии радиального сечения синхронных реактивных и индукторных электрических машин выполняется с единых позиций для всех типов. Это объясняется тем, что магнитные системы имеют сходства: наличие спинок статора и ротора, наличие зубцов на статоре и роторе, наличие воздушного зазора. На рис. 1а изображено радиальное сечение обобщенного электромеханического преобразователя, где выделены зоны спинок статора и ротора, зубцовые зоны, а также воздушный зазор. В качестве базовой геометрии для радиального сечения использовалась геометрия асинхронной машины с короткозамкнутым ротором МО160М4 в четырехполюсном варианте. Размеры зубцовой зоны статора приведены на рис. 1б, приводится площадь паза для размещения обмотки.

Исследование особенностей соотношения геометрических размеров элементов магнитных систем разных типов электрических машин на примере электромеханического преобразователя средней мощности позволило обобщить и экстраполировать результаты на диапазоны большой и малой мощности за счет вариации величины воздушного зазора и линейной нагрузки. Известно, что доля магнитного сопротивления воздушного зазора для машин малой мощности больше, чем для машин большой мощности. Дополнительно к этому величина линейной нагрузки в машинах малой мощности меньше, чем в машинах большой мощности [23].

Постановка задачи синтеза радиального сечения включает в себя поиск наилучших соотношений размеров элементов магнитной системы, выбор критерия, определяющего наилучший вариант, ограничения на размеры элементов и функциональные связи.

В данном случае задачу следует рассматривать как многокритериальную из-за вариации линейной нагрузки от номинального режима до перегрузки. В этом случае один и тот же критерий будет наилучшим при разных размерах элементов магнитной системы. Такую задачу целесообразно свести к однокритериальной путем введения обобщенной целевой функции:

$$Q = \min_{X \in X_{\text{доп}}} (q_1(X), q_2(X), q_3(X)). \quad (1)$$

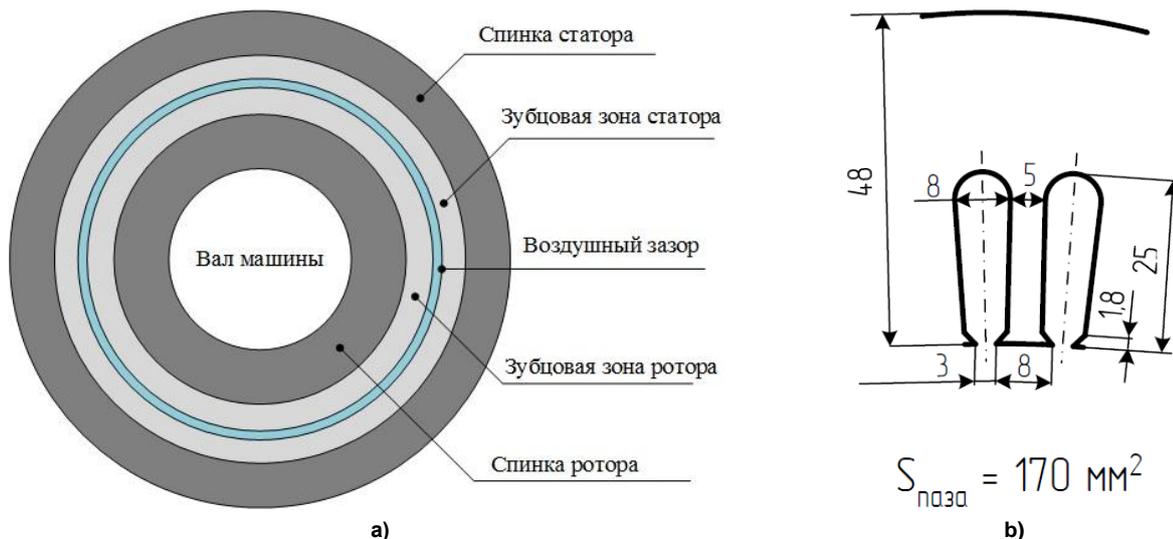


Рис. 1. К построению моделей электрических машин: а – радиальное сечение обобщенной электрической машины; б – размеры зубцовой зоны статора асинхронной машины MO160M4

Fig. 1. To the construction of models of electrical machines: а – a radial section of a generalized electrical machine; б – the dimensions of the tooth zone of the stator of the MO160M4 asynchronous machine

Здесь q_1 , q_2 и q_3 – критерии оптимизации, которые являются функциями вектора параметров $X = (bz_{ST}, hp_{ST}, hp_R, bz_R, D_R, \alpha_R, \delta)$; bz_{ST} – ширина зубцов статора; hp_{ST} – высота зубцов (пазов) статора; hp_R – высота зубцов (пазов) ротора; bz_R – ширина зубцов ротора; D_R – диаметр ротора; α_R – угол поворота ротора; δ – величина воздушного зазора. Критерии оптимизации неизбежно вступают в конфликт между собой, поэтому оптимальное решение лучше находить по критерию Парето методом скалярного ранжирования. Наилучшей в нашем случае будет являться аддитивная функция скаляризации [24]. В ряде источников рекомендуется брать от 2 до 3 таких критериев [25].

При проектировании электромеханических преобразователей с разными конструкциями магнитной системы и учетом работы в зоне перегрузок по току и моменту нагрузки обязателен учет распределения магнитного поля по элементам магнитной системы. Учесть это можно путем использования математического описания (функциональных связей), где магнитная структура

представлена системой с распределенными параметрами. Примером такого подхода являются конечно-элементные математические модели электрических машин.

Ограничения на размеры элементов магнитных систем сведены в таблицу.

Метод решения задачи синтеза наилучшей геометрии радиального сечения электромеханического преобразователя должен давать результат за минимальное количество итераций, а также должна быть обеспечена сходимость результата. В исследовании использовался метод последовательного нелинейного программирования (ПНП). Преимущество этого метода перед методом «квази-Ньютона» заключается в том, что переменные не имеют минимальный размер шага изменения, т. е. принимают любое значение в пределах допустимой области и числовой точности. Кроме того, метод ПНП имеет более высокую практическую скорость сходимости, чем метод «квази-Ньютона». Создаваемая методом ПНП поверхность отклика позволяет уменьшить количество итераций конечно-

Ограничения на параметры оптимизации
Restrictions on optimization parameters

Номер	Параметр	min	ном.	max
1	Ширина пазов статора bz_S , град.	0	3,75	$360/Z_S$
2	Ширина пазов ротора bz_R , град.	0	45	$360/2p$
3	Радиус ротора D_R , мм	$d_B + hp_R$	78	$127 - hp_{ST} - \delta$
4	Величина воздушного зазора δ , мм	0	1	$127 - D_R - hp_{ST}$
5	Высота полюса ротора hp_R , мм	0	24	$D_R - d_B$
6	Высота паза статора hp_{ST} , мм	0	25	$127 - D_R - \delta$
7	Величина тока в пазу I_P , А	0	552	$5 \cdot I_H$
8	Угол поворота ротора α_R , град.	0	17	360
9	Наружный радиус машины D_H , мм	127	127	127
10	Радиус вала ротора d_B , мм	32	32	32

элементного моделирования за счет прогноза и ускорить решение задачи. С увеличением количества решений методом конечных элементов улучшается сходимость результатов.

С учетом вышесказанного был предложен алгоритм решения поставленной задачи. Задача ре-

шалась для двух предельных состояний магнитной системы: ненасыщенной и сильно насыщенной. В первом случае задавался номинальный ток в обмотках, во втором случае задавался 4-кратный ток относительно номинального значения. Задача также решалась при постоянном значении потерь в

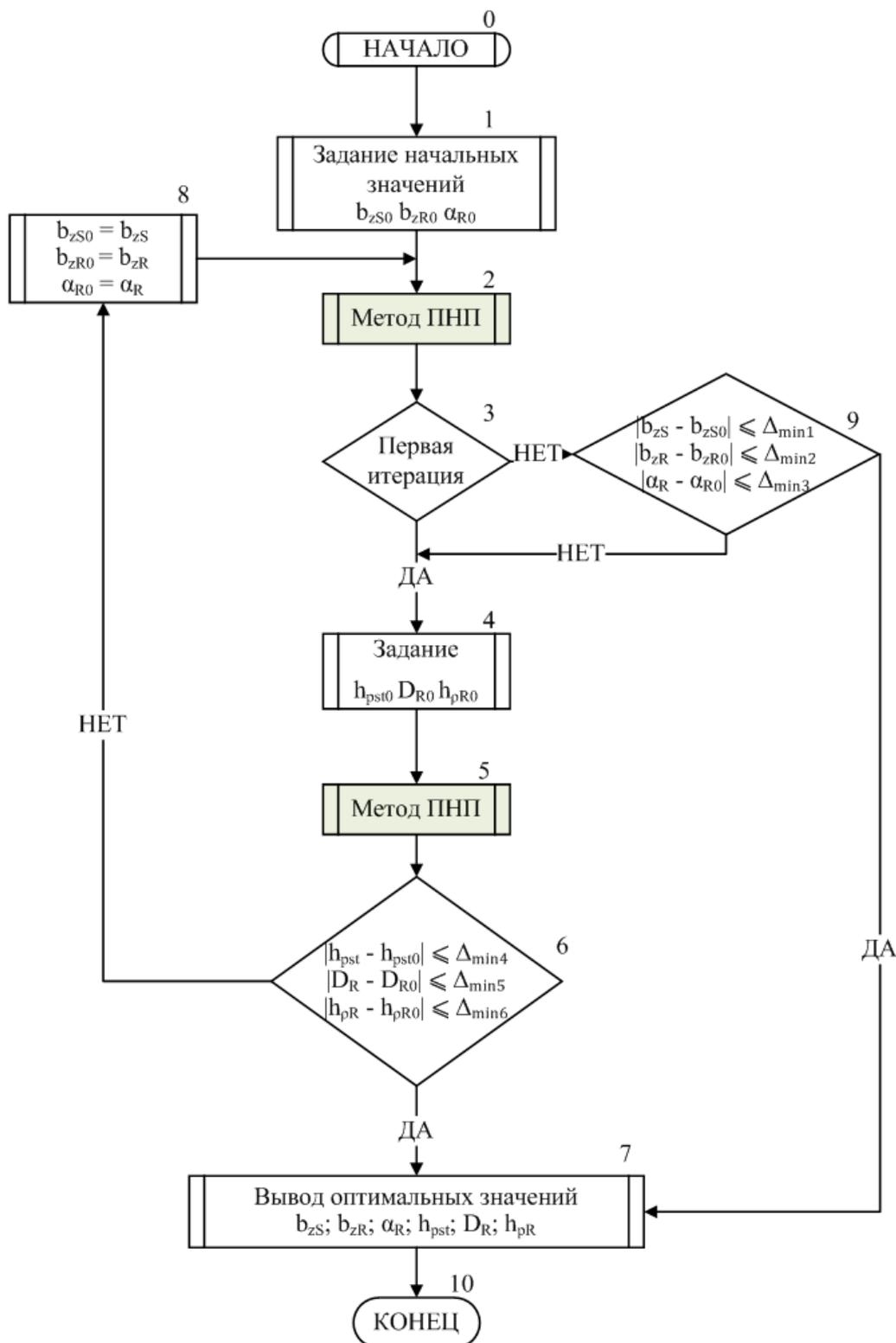


Рис. 2. Обобщенный алгоритм поиска наилучших размеров элементов магнитной системы СРМ и ИМ
Fig. 2. Generalized algorithm for finding the best sizes of elements of the magnetic system SRM and IM

меди обмоток, т. е. при поддержании постоянства произведения линейной нагрузки на плотность тока в проводниках. Отсюда величина требуемого пазового тока рассчитывалась по формуле:

$$P_{CU} = k_{CU} \cdot \frac{I_P^2}{S_P},$$

$$I_P = \sqrt{\frac{P_{CU}}{k_{CU}} \cdot S_P},$$
(2)

где k_{CU} – коэффициент пропорциональности; I_P – величина пазового тока; S_P – площадь паза.

Токи в фазных обмотках всех модификаций синхронных реактивных и индукторных электрических машин задавались одинаковыми по величине, а направление выбиралось таким образом, чтобы амплитудное значение МДС в зазоре было бы максимальным.

Алгоритм поиска наилучших размеров элементов магнитных систем представлен на рис. 2. В блоке 1 задавались начальные размеры ширины зубцов статора и ротора, а также начальное положение ротора, которые образуют первую группу параметров. При изменении ширины зубцов статора или ротора меняется гармонический состав проводимостей магнитного потока со стороны статора или ротора. Это приводит к изменению величины зубцовых пульсаций и среднего значения электромагнитного момента при заданном угле α_R положении ротора. В блоке 4 задается вторая группа параметров, которая не влияет на величину пульсаций момента. Разделение параметров оптимизации на 2 группы помогает достичь заданной точности оптимизации за меньшее количество итераций. В блоках 2 и 5 методом последовательного нелинейного программирования (ПНП) осуществляется поиск оптимальных значений параметров. В блоке 3 проверяется номер итерации. В случае второй и последующих итераций проверяется величина изменения параметров оптимизации первой группы после оптимизации в блоке 2, чтобы принять решение о продолжении или завершении оптимизационных процедур. В блоке 6 проводится аналогичная проверка для другой

группы параметров после оптимизации методом ПНП (блок 5). В блоке 7 выводятся результаты расчета.

Во второй части исследования приводятся данные по чувствительности удельного электромагнитного момента к величине воздушного зазора.

Синтез конечно-элементных моделей

Для синтеза наилучших вариантов радиальной геометрии были выбраны наиболее перспективные типы синхронных реактивных и индукторных электрических машин.

Синхронные реактивные машины (СРМ) представлены в четырехполюсном варианте (рис. 3). Количество фаз в данном случае роли не играет, так как рассматриваются только статические режимы работы, по обмоткам протекает постоянный ток. Синхронная реактивная машина с зубчатым ротором (СРМсЗР) характеризуется высокой прочностью и технологичностью изготовления ротора, низкой его стоимостью (рис. 3а). Синхронная реактивная машина с анизотропным ротором в первом исполнении (СРМсАР1) характеризуется отношением индуктивностей по продольной и поперечной осям от 4 до 6, при этом возрастает сложность и снижается технологичность изготовления ротора, снижается его прочность (рис. 3б). Синхронная реактивная машина во втором исполнении (СРМсАР2) характеризуется более высоким отношением реактансов от 7 до 9, но пульсации момента в этом случае выше, кроме того, еще сильнее уменьшается механическая прочность (рис. 3с).

Выбраны две конструктивные модификации четырехполюсных синхронных реактивных машин с двухсторонней зубчатостью (рис. 4). Вентильно-индукторная машина (ВИМ) представлена в конфигурации 12/8 (рис. 4а). Она характеризуется малым числом зубцов на статоре и роторе, а также катушечной (зубцовой) обмоткой. Ток при поиске наилучшей геометрии радиального сечения задавался только в одной фазе обмотки. Электромеханический преобразователь с большим числом зуб-

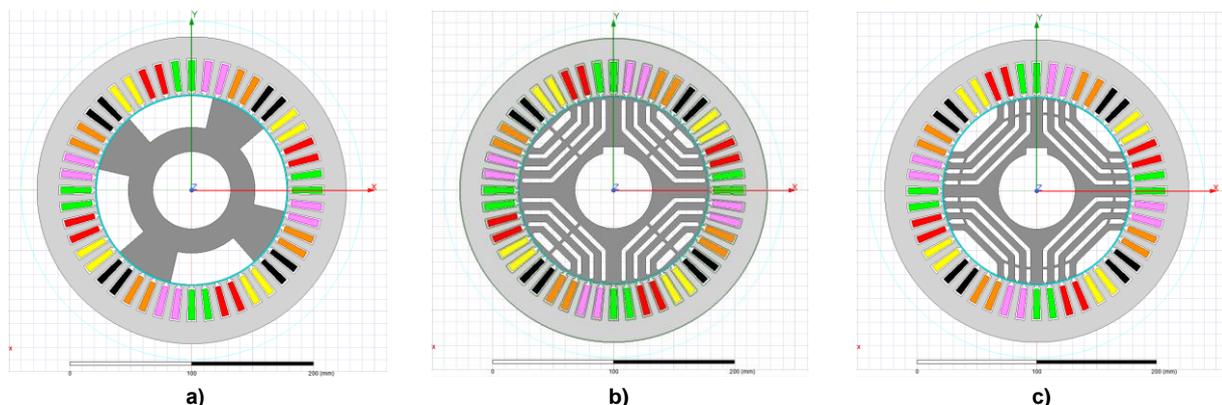


Рис. 3. Модификации СРМ
Fig. 3. SRM modifications

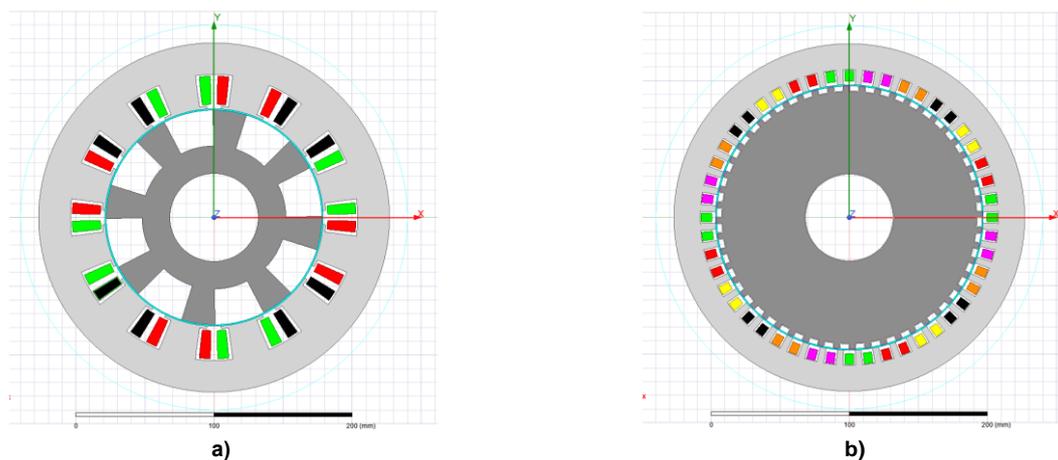


Рис. 4. Модификации СРМсДЗ
Fig. 4. Modifications of SRMsDZ

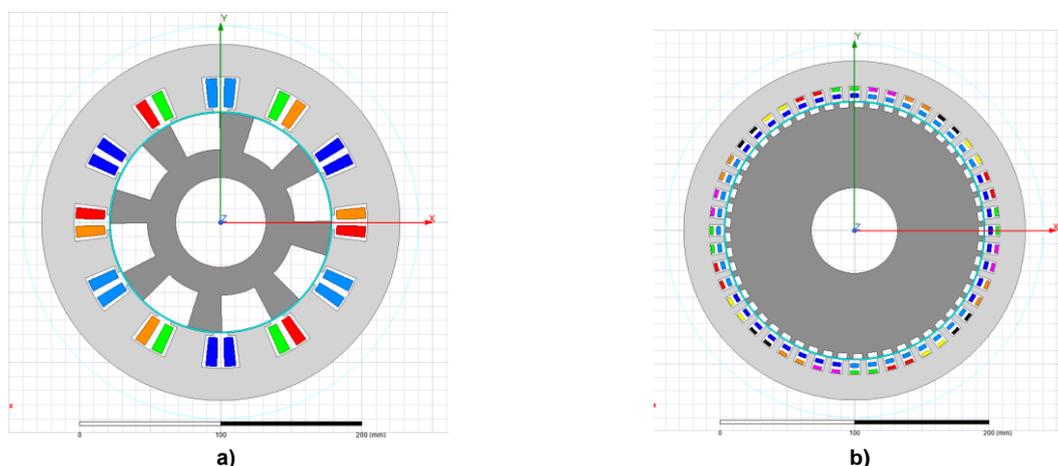


Рис. 5. Модификации ИМсДЗ
Fig. 5. Modifications of FSDC

цов на статоре и роторе (СРМсДЗ), а также с распределенной обмоткой на статоре представлен на рис. 4б.

В индукторных электрических машинах (рис. 5) в отличие от синхронных реактивных электромеханическое преобразование энергии осуществляется не за счет изменения собственной индуктивности многофазной силовой обмотки, а за счет изменения взаимной индуктивности между силовой обмоткой и обмоткой возбуждения в функции угла поворота ротора. Индукторная машина с малым числом зубцов на статоре и роторе называется машиной с переключением поля или в английской терминологии *Flux-Switched Direct Current (FSDC)* и является аналогом ВИМ, только с независимым возбуждением (рис. 5а). Причем обе обмотки располагаются в радиальном сечении машины. В данном случае силовая обмотка является двухполюсной, а обмотка возбуждения 6-полюсной. Токи в силовой обмотке при поиске наилучшей геометрии радиального сечения задавались только в двух фазах. Индукторная машина с большим числом зубцов на статоре и роторе

(ИМсДЗ) содержит четырехполюсную силовую обмотку и шестиполюсную обмотку возбуждения (рис. 5б).

Результаты синтеза и их обсуждение

На рис. 6 показаны результаты поиска наилучших размеров спинки статора и ширины его зубцов. Все величины представлены в относительных единицах. Высота спинки статора отнесена к внешнему диаметру машины и ширина зубцов статора отнесена к зубцовому делению статора. Все размеры элементов магнитной системы уменьшились относительно базовой геометрии асинхронной машины при номинальных значениях токов в обмотках (оптимизация под номинал). Это объясняется особенностью работы синхронных реактивных и индукторных машин, где наиболее важным параметром является отношение реактансов по продольной и поперечной осям машины. При уменьшении размеров элементов магнитной системы это отношение возрастает. Поэтому их выгодно проектировать с существенно большей долей обмоточной меди относительно электротех-

нической стали. При перегрузке соотношение несколько смещается в сторону стали. При перегрузке (оптимизация под перегрузку) доля стали относительно обмоточной меди несколько возрастает из-за сильного насыщения магнитной системы. Сильнее всего уменьшились размеры элементов магнитной системы у СРМсДЗ, ИМсДЗ, ВИМ и FSDC, т. е. у машин, конструкция, алгоритмы

управления и принцип работы существенно отличаются от асинхронной машины.

На рис. 7 приведены наилучшие размеры ширины зубцов ротора, отнесенные к зубцовому делению ротора, высоты спинок ротора и его диаметры, отнесенные к внешнему диаметру машины. Ширина зубцов ротора снижалась при оптимизации, увеличивая отношение реактансов по про-

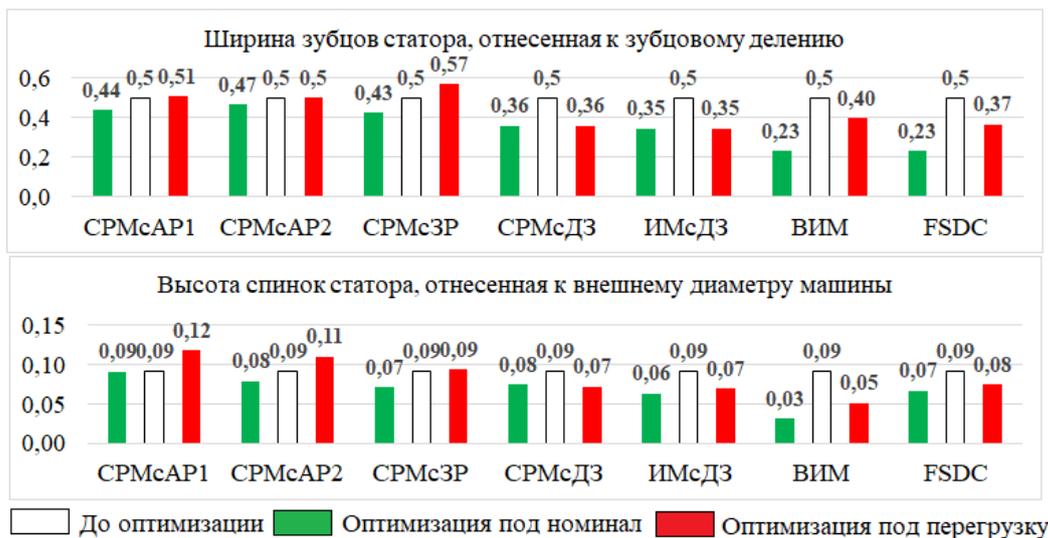


Рис. 6. Размеры элементов магнитных систем статоров СРМ и ИМ
 Fig. 6. Dimensions of the elements of the magnetic systems of the stators CRM and IM

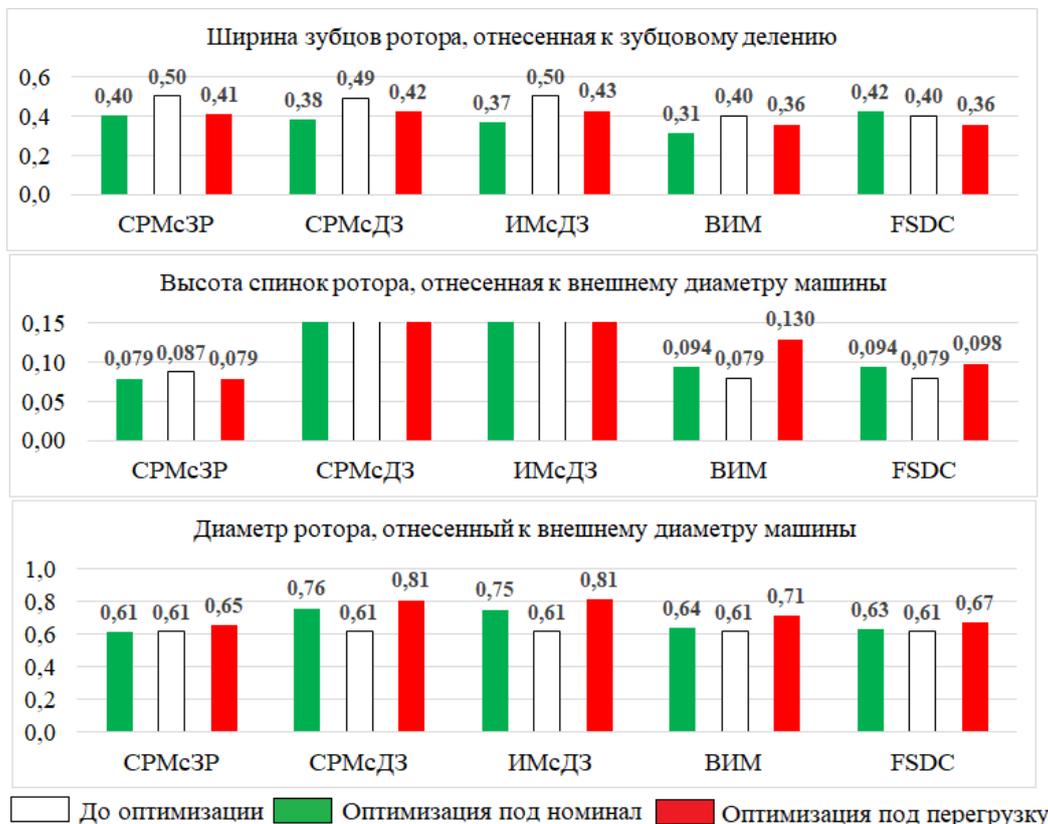


Рис. 7. Размеры элементов магнитных систем роторов СРМ и ИМ
 Fig. 7. Dimensions of the elements of the magnetic systems of the rotors CRM and IM

дольной и поперечной осей машины. Высота спинок ротора является завышенной из-за фиксированного диаметра вала ротора. Общей закономерностью является увеличенное значение диаметра ротора за счет сокращения размеров элементов статора. С увеличением мощности машины оптимальное соотношение меди и стали смещается в сторону последней из-за возрастания электромагнитных нагрузок, что эквивалентно режиму перегрузки для машин меньшей мощности.

На рис. 8 приведен эффект от оптимизации. Общей закономерностью здесь является увеличение удельного показателя при оптимизации под один режим работы и уменьшение критерия опти-

мизации при оптимизации под другой режим работы. Введен критерий интегрального эффекта от оптимизации при равных весовых коэффициентах частных критериев. Положительный эффект в наибольшей степени наблюдается в номинальном режиме работы для ВИМ и FSDC. Самый большой эффект наблюдается у СРМсДЗ в перегрузочном режиме работы. Это объясняется сильным расхождением оптимальной геометрии этой машины от оптимальной геометрии асинхронной машины, которая была взята за базу при проведении оптимизационных процедур.

На рис. 9 показано семейство зависимостей между величинами воздушного зазора и электро-

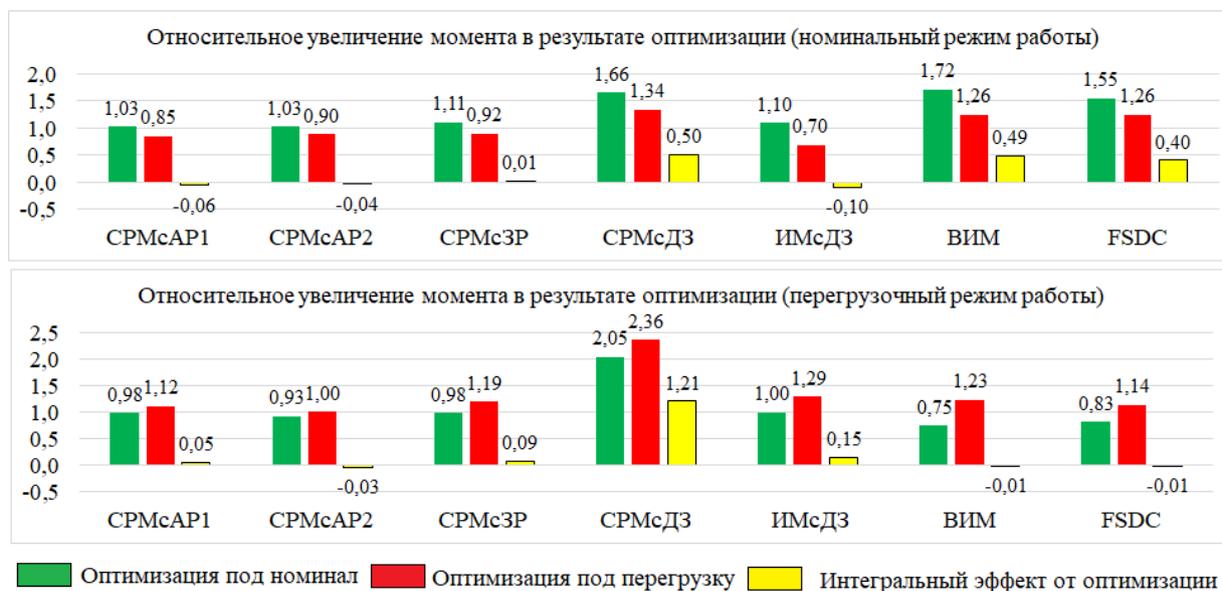


Рис. 8. Эффект от оптимизации магнитных систем СРМ и ИМ
Fig. 8. Effect of optimizing the magnetic systems of CPM and MI

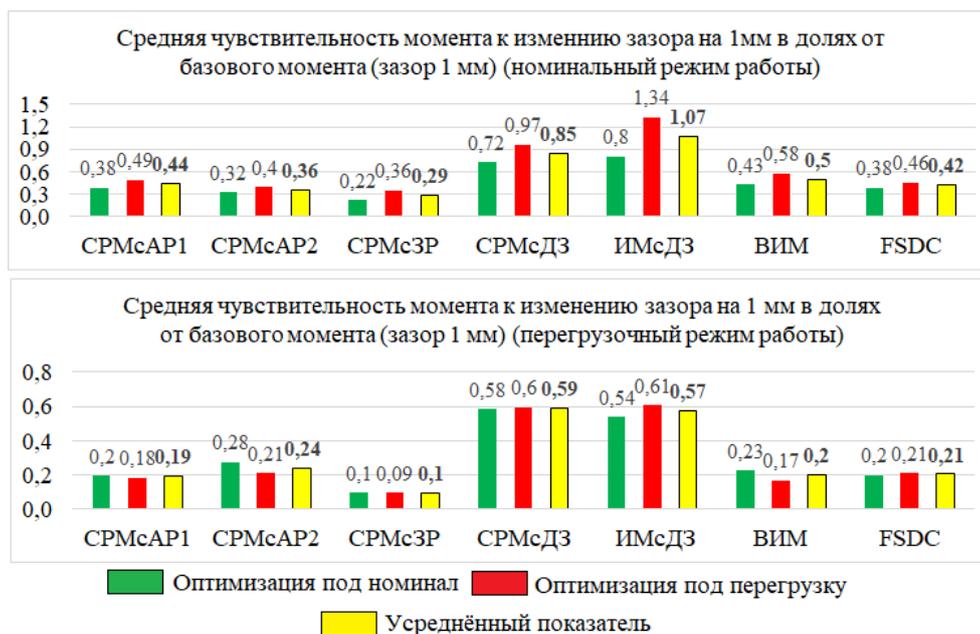


Рис. 9. Чувствительность момента СРМ и ИМ к изменению зазора
Fig. 9. Sensitivity of the moment of CRM and MI to the gap change

магнитного момента. Известно, что в машинах малой мощности доля магнитного сопротивления, приходящаяся на зазор значительно больше, чем у машин большой мощности. Это обстоятельство позволяет прогнозировать темп изменения удельного момента при изменении мощности машины. С другой стороны, малая чувствительность позволяет проектировать электрические машины с большим зазором без существенных потерь в удельном моменте. Например, наибольшая чувствительность у СРМсДЗ и ИМсДЗ, так как отношение реактансов в таких машинах изменяется не за счет изменения глубины паза, а за счет изменения индуктивности в согласованном положении зубцов ротора с зубцами статора, что достигается изменением величины воздушного зазора. Для этих машин с возрастанием мощности удельный момент будет существенно увеличиваться.

Выводы

По результатам исследования выделены следующие особенности синтеза синхронных реактивных и индукторных электрических машин.

1. Доля обмоточной меди относительно стали в активной части машин возрастает относительно машин традиционного исполнения при работе в номинальном режиме. Эта особенность проявляется в меньшей степени при работе в зоне перегрузок по моменту.

2. С увеличением мощности синхронных реактивных и индукторных электрических машин возрастают электромагнитные нагрузки, что эквивалентно работе машины меньшей мощности в режиме перегрузки.

3. Чувствительность к величине воздушного зазора у машин с двухсторонней зубчатостью и распределенной обмоткой на статоре самая большая в исследуемом классе, поэтому с возрастанием мощности удельный момент будет существенно увеличиваться.

4. Наименьшая чувствительность к величине воздушного зазора у машин с односторонней зубчатостью и распределенной обмоткой на статоре. Это обстоятельство позволяет выполнять эти машины с большей величиной зазора без ущерба для удельного момента.

Список литературы

1. Jarrad G.W. Design of a reluctance synchronous machine for traction motor applications using the finite element method. University of the Witwatersrand, Johannesburg, Thesis for the degree of Master of Science in Engineering, 2010.
2. Evaluation of torque ripple in high performance synchronous reluctance machines / A. Fratta, G.P. Troglia, A. Vagati, F. Villata // IEEE-IAS Annual meeting, Toronto (Canada). October 1993. Vol. 1. P. 163–170.
3. Fratta A., Vagati A. Axially laminated reluctance motor: an analytical approach to the magnetic behaviour // ICEM, Pisa, Italy, 12–14 Sept. 1988. P. 1–6.
4. A 250kW Transverse-Laminated Synchronous Reluctance Motor / G. Pellegrino, E. Armando, P. Guglielmi, A. Vagati // Proceedings of the Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on, 8–10 September 2009. P. 1–10.
5. Naataja J. A comparative performance study of four-pole induction motors and synchronous reluctance motors in variable speed drives. Thesis for the degree of Doctor of Science (Technology), Lappeenranta University of Technology, June, 2003. 135 p.
6. Marongiu I., Vagati A. Improved modelling of a distributed anisotropy synchronous reluctance machine // IEEE-IAS, 1991, Dearborn, USA, October 1991. P. 238–243.
7. Методика расчёта электродвигателей и генераторов на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов и др. // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2009. Вып. 17. С. 43–47.
8. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н. Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2008. Вып. 9, № 11 (111). С. 52–53.
9. Sekine T.H., Hijikata K.M., Tanaka Y.S. Investigation of torque and suspension force characteristic in a reluctance type bearingless vernier motor // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002362
10. Tounzi A.T. Study of a rotor current excited vernier reluctance machine // Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines. 2008. No. 6. P. 25–32.
11. Qishan G.S., Chun G.M., Andresen E.M. Airgap permeance of vernier-type, doubly slotted magnetic structures // Electric Power Applications, IEE Proceedings. 1988. Iss. 135, no. 1. P. 17–21.
12. Кузнецов В.А., Кузмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 70 с.
13. Обзор подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования / Н.Ф. Карнаухов, М.Н. Филимонов, Д.А. Статовой, А.С. Лыков // Вестник ДГТУ. 2016. № 2 (85). С. 51–58.

14. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2015. Т. 2, № 3. С. 23–33.
15. Фисенко В.Г., Попов А.Н. Проектирование вентильных индукторных двигателей. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 56 с.
16. Faiz J., Finch J.W. Aspects of design optimisation for switched reluctance motors // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1993. Vol. 8, no. 4. P. 704–713. DOI: 10.1109/60.260984
17. Finch J.W., Faiz J., Metwally H.M.B. Design study of switched reluctance motor performance // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1992. Vol. 1. P. 242–248.
18. Конечно-элементная модель электрической машины с переключением потока для исследования динамических режимов работы / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, Ф.Н. Сарапулов, В.А. Климарев // *Электротехника*. 2012. № 3. С. 7–13.
19. Cao W.H.R., Jin Y., Zhang Y. A new general design method of segmented rotor wound field flux switching motors with complementary magnet circuit // *IEEE Magnetics Conference (INTERMAG)*. 2015. P. 4731.
20. Low-Cost, High-Power Density, Flux Switching Machines and Drives for Power Tools / H. Pollock, C. Pollock, R.T. Walter, B.V. Gorti // *Proc. IEEE – Industry Applications Conf.* 2003. P. 1451–1457.
21. Pollock C., Wallace M. The flux switching motor, a dc motor without magnets or brushes // *Proc. IEEE – Industry Applications Conf.* 1999. Vol. 3. P. 1980–1987.
22. Zulu A., Mecrow B.C., Armstrong M. Topologies for three phase Wound field Segmented Rotor flux switching Machines // *5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)*. 2010. P. 1–6.
23. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2002. 757 с.
24. Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. М.: Радио и связь, 1984. 287 с.
25. Лемешко Б.Ю. Методы оптимизации: конспект лекций. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 126 с.

References

1. Jarrad G.W. Design of a reluctance synchronous machine for traction motor applications using the finite element method. University of the Witwatersrand, Johannesburg, Thesis for the degree of Master of Science in Engineering, 2010.
2. Fratta A., Troglia G.P., Vagati A., Villata F. Evaluation of torque ripple in high performance synchronous reluctance machines // *IEEE-IAS Annual meeting, Toronto (Canada)*. October 1993. Vol. 1. P. 163–170.
3. Fratta A., Vagati A. Axially laminated reluctance motor: an analytical approach to the magnetic behaviour. *ICEM*, Pisa, Italy, 12–14 Sept. 1988. P. 1–6.
4. A 250kW Transverse-Laminated Synchronous Reluctance Motor / G. Pellegrino, E. Armando, P. Guglielmi, A. Vagati. In: *Proceedings of the Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on*, 8–10 September 2009. P. 1–10.
5. Haataja J. *A comparative performance study of four-pole induction motors and synchronous reluctance motors in variable speed drives*. Thesis for the degree of Doctor of Science (Technology), Lappeenranta University of Technology, June, 2003. 135 p.
6. Marongiu I., Vagati A. Improved modelling of a distributed anisotropy synchronous reluctance machine. In: *IEEE-IAS, 1991*, Dearborn, USA, October 1991. P. 238–243.
7. Usynin Yu.S., Grigor'ev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N., Bychkov A.E. [Method for calculating electric motors and generators based on a synchronous reluctance machine of independent excitation]. In: *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Electrical systems and complexes]. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University; 2009. Iss. 17. P. 43–47. (In Russ.)
8. Usynin Yu.S., Grigor'ev M.A., Vinogradov K.M., Gorozhankin A.N. [Specific indicators of an electric drive with a synchronous reluctance motor of independent excitation]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2008;9(11):52–53. (In Russ.)
9. Sekine T.H., Hijikata K.M., Tanaka Y.S. Investigation of torque and suspension force characteristic in a reluctance type bearingless vernier motor. In: *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002362
10. Tounzi A.T. Study of a rotor current excited vernier reluctance machine. In: *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*; 2008. No. 6. P. 25–32.
11. Qishan G.S., Chun G.M., Andresen E.M. Airgap permeance of vernier-type, doubly slotted magnetic structures. *Electric Power Applications, IEE Proceedings*. 1988;135(1):17–21.
12. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. *Ventil'no-induktornyye dvigateli* [Switched reluctance motors]. Moscow: MPEI Publ.; 2003. 70 p. (In Russ.)

13. Karnaukhov N.F., Filimonov M.N., Statovoy D.A., Lykov A.S. [Overview of approaches to reducing the pulsations of the electromagnetic torque of a valve-reluctance motor using mathematical modeling methods]. *Vestnik DSTU*. 2016;2(85):51–58. (In Russ.)
14. Ptakh G.K. [Valve-inductor reluctance electric drive of medium and high power: foreign and domestic experience]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*. 2015;2(3):23–33. (In Russ.)
15. Fisenko V.G., Popov A.N. Proektirovanie ventil'nykh induktornykh dvigateley [Design of switched reluctance motors]. Moscow: MPEI Publ.; 2005. 56 p. (In Russ.)
16. Faiz J., Finch J.W. Aspects of design optimisation for switched reluctance motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1993;8(4). P. 704–713. DOI: 10.1109/60.260984
17. Finch J.W., Faiz J., Metwally H.M.B. Design study of switched reluctance motor performance. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1992;1:242–248.
18. Dmitrievskiy V.A., Prakht V.A., Sarapulov F.N., Klimarev V.A. [Finite element model of an electric machine with flow switching for the study of dynamic modes of operation]. *Elektrotehnika*. 2012;3:7–13. (In Russ.)
19. Cao W.H.R., Jin Y., Zhang Y. A new general design method of segmented rotor wound field flux switching motors with complementary magnet circuit. In: *IEEE Magnetics Conference (INTERMAG)*; 2015. P. 4731.
20. Pollock H., Pollock C., Walter R.T., Gorti B.V. Low-Cost, High-Power Density, Flux Switching Machines and Drives for Power Tools. In: *Proc. IEEE – Industry Applications Conf.*; 2003. P. 1451–1457.
21. Pollock C., Wallace M. The flux switching motor, a dc motor without magnets or brushes. In: *Proc. 1999 IEEE – Industry Applications Conf.*; 1999. Vol. 3. P. 1980–1987.
22. Zulu A., Mecrow B.C., Armstrong M. Topologies for three phase Wound field Segmented Rotor flux switching Machines. In: *5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD)*; 2010. P. 1–6.
23. Kopylov I.P., Klokov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: ucheb. dlya vuzov* [Design of electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola; 2002. 757 p. (In Russ.)
24. Brakhman T.R. *Mnogokriterial'nost' i vybor al'ternativy v tekhnike* [Multicriteria and the choice of alternatives in engineering]. Moscow: Radio i svyaz'; 1984. 287 p. (In Russ.)
25. Lemeshko B.Yu. *Metody optimizatsii: konspekt lektsiy* [Optimization Methods: Lecture Notes]. Novosibirsk: NSTU Publ.; 2009. 126 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Горожанкин Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доц., кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gorozhankinan@susu.ru.

Коржов Антон Вениаминович, д-р техн. наук, проф., кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; korzhovav@susu.ru.

Information about the authors

Alexey N. Gorozhankin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gorozhankinan@susu.ru.

Anton V. Korzhov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; korzhovav@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 15.05.2022; одобрена после рецензирования 03.06.2022; принята к публикации 03.06.2022.

The article was submitted 15.05.2022; approved after reviewing 03.06.2022; accepted for publication 03.06.2022.