

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ, ИНДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.Н. Горожанкин, gorozhankinan@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8748-4700>
Н.М. Максимов, maximov@susu.ru
Л.А. Ржавцев, rzavtsev@mail.ru
Д.Д. Захаров, zakharov633dd@gmail.com
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Предложен метод оптимизации, который позволил увеличить удельные показатели синхронных реактивных и индукторных электрических машин (удельный момент, КПД, коэффициент мощности) до теоретически возможного предела как при номинальной нагрузке, так и в зоне четырехкратной перегрузки по фазному току. Показано, что удельный момент на единицу массы при равных потерях и тепловых состояниях синхронных реактивных и индукторных электрических машин в сравнении с аналогичным показателем асинхронного двигателя в номинальном режиме лежит в диапазоне от –5 до 75 %, в режиме 4-кратной перегрузки по току – в диапазоне от –36 до 66 %. Показатели по действующему и максимальному напряжениям для электрических машин рассматриваемого класса, чья скорость ротора сопоставима с аналогичным показателем асинхронного двигателя, выше на 10–45 %. Это следует учитывать при проектировании для них электрического преобразователя, заложив соответствующие запасы по напряжению. Показано, что по величине показателей отношения момента к действующему и максимальному напряжениям синхронные реактивные и индукторные электрические машины превосходят асинхронный двигатель до 3–6 крат. Предложен критерий оптимизации, равный отношению электромагнитного момента к действующему значению индукции в зазоре, который позволяет, используя конечно-элементные модели и рассмотренный в статье метод оптимизации, получить оптимальные с точки зрения электробезопасности и потерь в стали синхронные реактивные и индукторные электрические машины.

Ключевые слова: удельные показатели, повышение электробезопасности, перенапряжения, геометрия активной зоны, управляющие воздействия, синхронные реактивные электрические машины, конечно-элементные модели

Для цитирования: Метод улучшения удельных показателей синхронных реактивных, индукторных электрических машин и повышения электробезопасности при их эксплуатации / А.Н. Горожанкин, Н.М. Максимов, Л.А. Ржавцев, Д.Д. Захаров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2024. Т. 24, № 2. С. 102–108. DOI: 10.14529/power240211

Original article
DOI: 10.14529/power240211

A METHOD FOR IMPROVING THE PERFORMANCE AND SAFETY OF SYNCHRONOUS RELUCTANCE AND INDUCTION MOTORS

A.N. Gorozhankin, gorozhankinan@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8748-4700>
N.M. Maksimov, maximov@susu.ru
L.A. Rzhavtsev, rzavtsev@mail.ru
D.D. Zakharov, zakharov633dd@gmail.com
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This paper proposes an optimization method to increase the performance of synchronous reluctance and inductor motors (specific torque, efficiency, power factor) to theoretical limit at rated load and in the zone of fourfold phase current overload. The specific torque per unit mass with equal losses and thermal states of synchronous reluctance and inductor motors in comparison with the same indicator of an asynchronous motor in nominal mode lies in the range from –5 to 75 % and in 4-mode multiple overcurrent in the range from –36 to 66 %. Indicators for effective and maximum voltages for motors whose rotor speed is comparable to that of an asynchronous motor, are 10–45 % higher. This should be taken into account when designing an electrical converter, allowing for appropriate voltage reserves. In terms of the ratio of torque to effective and maximum voltage, synchronous reluctance and inductor motors

are up to 3–6 times superior to asynchronous motors. An optimization criterion is proposed, equal to the ratio of the electromagnetic moment to the effective value of induction in the gap, which will allow, using finite element models and the optimization method discussed in the article, optimal synchronous reluctance and inductor motors from the point of view of electrical safety and losses in steel.

Keywords: performance indicators, increasing electrical safety, overvoltage, core geometry, control actions, synchronous reluctance motors, finite element models

For citation: Gorozhankin A.N., Maksimov N.M., Rzhavtsev L.A., Zakharov D.D. A method for improving the performance and safety of synchronous reluctance and induction motors. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2024;24(2):102–108. (In Russ.) DOI: 10.14529/power240211

Обзор литературы

Класс синхронных реактивных и индукторных электрических машин включает в себя ряд типов конструктивного исполнения активной части с различными алгоритмами управления и схемами фазных обмоток. Наибольший практический интерес представляют три типа: синхронные реактивные электрические машины с односторонней и двухсторонней зубчатостью, индукторные электрические машины. Рассмотрим каждый тип с точки зрения проработанности вопроса улучшения удельных показателей.

Синхронные реактивные машины с анизотропным ротором (СРМСАР) и односторонней зубчатостью характеризуются синусоидальными фазными токами и оптимизируются за счет вариации обширного набора геометрических параметров элементов ротора [1–3]. Достигается наибольшее отношение реактансов по продольной и поперечной осям ротора при умеренной величине пульсаций электромагнитного момента. Синхронные реактивные машины с зубчатым ротором (СРМСЗР) и односторонней зубчатостью оптимизируются как за счет вариации геометрических параметров магнитопровода, так и за счет коррекции алгоритмов управления [4]. Вентильно-индукторные машины (ВИМ) с двухсторонней зубчатостью, наиболее исследованные в классе, – оптимизация выполнялась как с номинальным режимом, так и режимах с перегрузками по току и моменту [5]. Синхронные реактивные и индукторные машины с двухсторонней зубчатостью и распределенными обмотками на статоре (СРМСДЗ и ИМСДЗ), а также вариант ВИМ с двумя независимыми обмотками на статоре (FSDC) – наименее исследованные в классе. В трудах, посвященных оптимизации таких машин, исследуются в основном номинальные режимы работы [6–8]. Таким образом, нет единого метода оптимизации удельных показателей всего класса синхронных реактивных и индукторных электрических машин в расширенном диапазоне моментов нагрузки, где принципиально использование конечно-элементных моделей, учитывающих резко нелинейные свойства активных материалов магнитопровода при насыщении.

Поражение электрическим током возникает, как правило, при повреждении изоляции электрических машин по двум причинам: перегрев обмоток и кратковременные перенапряжения. Меры

борьбы с первой причиной помимо разработки эффективных систем охлаждения включают в себя минимизацию удельных потерь путем улучшения удельных показателей электрических машин. Кратковременные перенапряжения в электрических машинах, как правило, связаны с коммутацией обмоток [9] и аварийными режимами электрических сетей. Меры борьбы со второй причиной включают в себя разработку современных устройств защиты от перенапряжений в электрических сетях, а также совершенствование изоляционных материалов путем улучшения их самовосстанавливающих свойств [10, 11]. В данной статье предлагается оригинальный метод классификации и оптимизации электрических машин по величине удельного момента на единицу действующего или максимального фазного напряжения, который позволит оценить и улучшить электробезопасность каждого типа машины.

Описание метода оптимизации синхронных реактивных и индукторных электрических машин

Суть метода заключается в комбинации двух путей улучшения удельных показателей электрических машин (удельного момента, КПД, коэффициента мощности) – с помощью модификации геометрии активной зоны и диаграммы периода тока в фазных обмотках (управляющего воздействия). В [12] описан первый путь – модификация конструкции активной зоны. В данной статье приводится второй путь – модификация управляющего воздействия и результаты оптимизации, полученные комбинированным способом.

Для поиска наилучших алгоритмов управления с точки зрения улучшения удельных показателей синхронных реактивных и индукторных электрических машин на конечно-элементных моделях предложено формировать наилучшие величины токов в фазных обмотках через равные интервалы времени, когда ротор занимает последовательно ряд положений внутри угловой фазной зоны обмотки статора. Количество положений выбирается из условий компромисса, с одной стороны, времени расчета, а с другой стороны – точности воспроизведения диаграмм тока в фазных обмотках. В каждом положении ротора оптимизируются соотношения токов для получения наибольшего момента при сохранении суммы потерь в меди.

Алгоритм оптимизации пояснен на рис. 1 на примере синхронной реактивной машины с зубчатым ротором в трехфазном четырехполюсном исполнении. В поперечном сечении обозначены двенадцать фазных зон и номера фаз, также показана величина фазной зоны α_{fz} , которая рассчитывается по формуле

$$\alpha_{fz} = \frac{2\pi}{m_f \cdot p_{zz}}, \quad (1)$$

где m_f – количество фаз; p_{zz} – число зубцов ротора.

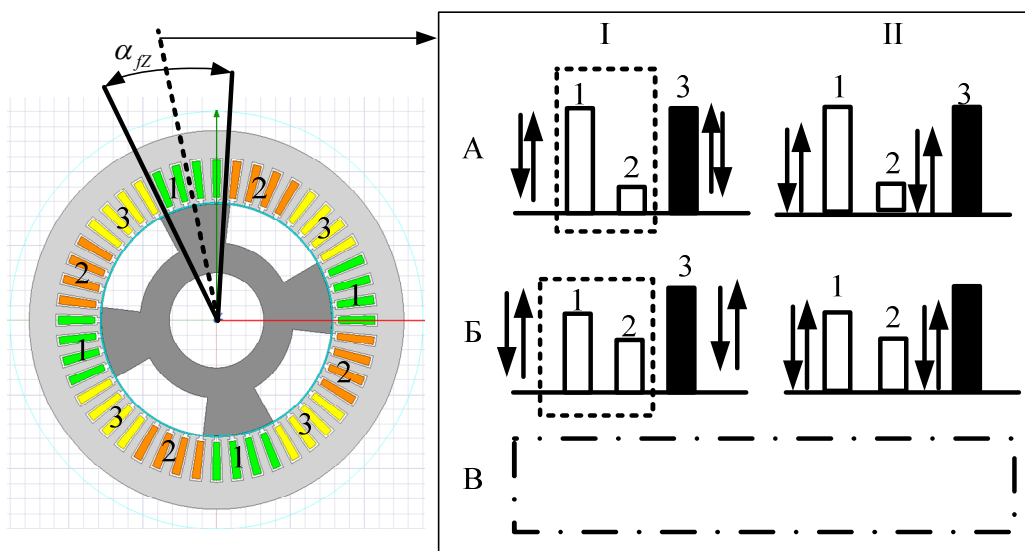


Рис. 1. Алгоритм оптимизации формы тока в фазных обмотках: I, II – этапы оптимизации; А, Б, В – итерации оптимизации; 1, 2, 3 – номера фазных токов
Fig. 1. Algorithm for optimizing the current shape in phase windings: I, II – optimization stages; А, Б, В – optimization iterations; 1, 2, 3 – numbers of phase currents

Фазная зона разбивается на ряд промежуточных положений. В правой части рис. 1 показана процедура оптимизации для произвольного положения ротора внутри фазной зоны. Это положение обозначено лучом, идущим от оси машины в поперечном сечении (пунктирная линия). На первом этапе оптимизации первой итерации (I, А) отношение токов 1 и 2 остается неизменным, а меняется отношение 1 и 3 токов по одному из алгоритмов одномерной поисковой оптимизации для поиска экстремума целевого показателя. На втором этапе оптимизации (II, А) ток 3 остается неизменным, а отношение токов 1 и 2 варьируется. Если на этом этапе соотношение токов изменилось больше, чем заданный минимальный диапазон (например, в процентах от исходной величины тока), то выполняется возврат на первый этап оптимизации, выполняется вторая итерация (I, Б), второй этап оптимизации на второй итерации аналогичен первой итерации (II, Б). Если в результате второй итерации токи 1 и 2 изменились несущественно, т. е. не вышли за заданную величину изменения, то оптимизация прекращается и выводятся оптимальные значения фазных токов 1, 2 и 3 в одном из положений ротора. Если токи 1 и 2 изменились существенно, выполняется третья итерация В и т. д.

После получения наилучших значений фазных токов для всех выбранных положений ротора внутри фазной зоны выполняется процедура получения оптимальной диаграммы фазного тока. Для этого значения токов первой фазы откладываются на оси времени последовательно от меньшего значения угла поворота ротора к большему углу, затем аналогично размещаются значения токов третьей фазы и, наконец, откладываются значения токов второй фазы. Таким образом, полученный полупериод дополняется волной противоположной полярности. Далее по значениям тока выполняется процедура разложения кривой в ряд Фурье с получением коэффициентов этого ряда:

$$\begin{aligned} a_0(t) &= \frac{2}{m} \cdot \sum_{j=0}^{m-1} I_j(t); \\ a_k(t) &= \frac{2}{\pi \cdot k} \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi}{m}\right) \cdot \sum_{j=0}^{m-1} I_j(t) \cdot \cos\left(k \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{2j+1}{2 \cdot m}\right]\right); \\ b_k(t) &= \frac{2}{\pi \cdot k} \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi}{m}\right) \cdot \sum_{j=0}^{m-1} I_j(t) \cdot \sin\left(k \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{2j+1}{2 \cdot m}\right]\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где I_j – j -е значение тока на оси времени; m – количество значений тока на периоде кривой; k – номер гармоники.

По результатам оптимизации наибольшее значение имеют первая и третья гармоники в диаграмме фазного тока для электрических машин с распределенными обмотками и четный ряд гармоник – для электрических машин с зубцовыми обмотками.

Результаты оптимизации и их обсуждение

В результате оптимизации получены значения электромагнитного момента, параметров напряжения на обмотках для разных типов синхронных реактивных и индукторных электрических машин в сопоставлении с асинхронной машиной-прототипом (см. таблицу). Значения электромагнитного момента в номинальном режиме (столбец «Ном.» в таблице) большинства типов электрических машин превышает аналогичное значение асинхронного двигателя (АД) при одинаковых тепловых состояниях машин. Наибольший показатель – у СРМсДЗ, он превышает показатель АД на 75 %, затем в порядке уменьшения – СРМсАР2 – на 45 %, СРМсАР1 – на 37 %, СРМсЗР – на 20 %, FSDC – на 2,5 %. Незначительно ниже, чем АД, этот показатель у ИМсДЗ и ВИМ – на 3 и 5 % соответственно. Повышенные показатели достигаются за счет значительно меньшего значения потерь в роторе. Незначительное снижение показателей по сравнению с АД получается за счет того, что в ВИМ и FSDC «работает» в каждый момент времени одна или две обмотки, в ИМсДЗ за счет размещения двух обмоток в том же объеме, где у других машин размещается одна обмотка. Значения электромагнитного момента в режиме с четырехкратной перегрузкой по току (столбец «Перегр.» в таблице) большинства типов электрических машин превышает аналогичное значение АД при одинаковых тепловых состояниях машин. Наибольший показатель – у СРМсАР2, он превышает показатель АД на 66 %, затем в порядке уменьшения – СРМсАР1 – на 54 %, ВИМ и FSDC – на 41 %, СРМсЗР – на 38 %. Незначительно ниже, чем у АД, этот показатель у СРМсДЗ и ИМсДЗ – на 4 и 36 % соответственно. В зоне перегрузок в связи с особенностями конструкции этих электрических машин, когда длина магнитных силовых линий по воздуху при размещении ротора по продольной оси немногим меньше, чем аналогичная длина при размещении ротора по поперечной оси, ухудшение проводимости стали в зоне перегрузок существенно выравнивает длины этих магнитных силовых линий, что приводит к резкому снижению отношения реактансов по продольной и попереч-

ной осям машин с последующим снижением электромагнитного момента.

Значения действующих фазных напряжений у синхронных реактивных машин с угловой скоростью ротора, близкой к скорости ротора АД – СРМсАР1, СРМсАР2 и СРМсЗР, в номинальном режиме работы совпадают с аналогичным показателем АД. В зоне перегрузки они больше на 8–18 %, что следует учитывать при проектировании электрического преобразователя для этих типов электрических машин, заложив запас по напряжению. Особенно это касается максимального значения напряжения, которое даже в номинальном режиме работы для этих типов электрических машин выше аналогичного показателя АД на 10–45 %, в зоне перегрузок выше на 25–35 %. Это объясняется пульсациями напряжения из-за зубчатости на статоре и явнополюсной структуры ротора. Напряжения остальных типов синхронных реактивных и индукторных электрических машин меньше, чем у АД как в номинальном, так и в перегрузочном режиме. Это объясняется низкой номинальной скоростью ротора от 57 до 750 об/мин. Исключение составляет ВИМ в зоне перегрузок, где наблюдаются сильные перенапряжения (на 35 % выше, чем у АД) при обрыве тока системой управления для отсечения отрицательного участка электромагнитного момента.

На рис. 2 приведены значения удельного электромагнитного момента на единицу напряжения в сравнении с аналогичным показателем АД, который косвенно может служить показателем электробезопасности электрических машин различных типов. В номинальном режиме работы для электрических машин, чья скорость ротора близка к АД (СРМсАР1, СРМсАР2 и СРМсЗР), показатель отношения момента к действующему значению фазного напряжения выше, чем у АД на 40–60 %. Показатель отношения момента к максимальному фазному напряжению совпадает с аналогичным показателем АД. Для других типов синхронных реактивных и индукторных электрических машин показатели по удельному моменту на единицу напряжения существенно выше. Максимальные значения показателей FSDC превышают показате-

Значения параметров электрических машин
Parameters for motors

Тип электрической машины	Электромагнитный момент M , Нм		Действующее значение напряжения U , В		Максимальное значение напряжения U_m , В		Скорость ω , об/мин
	ном.	перегр.	ном.	перегр.	ном.	перегр.	
АД	120	360	220	230	310	324	1450
СРМсАР1	164	556	220	260	341	404	1500
СРМсАР2	175	598	221	260	450	415	1500
СРМсЗР	143	497	214	239	404	435	1500
СРМсДЗ	211	344	151	135	239	274	115
ИМсДЗ	116	230	52	51	75	84	57
ВИМ	114	509	94	220	94	435	750
FSDC	123	509	44	74	77	265	375

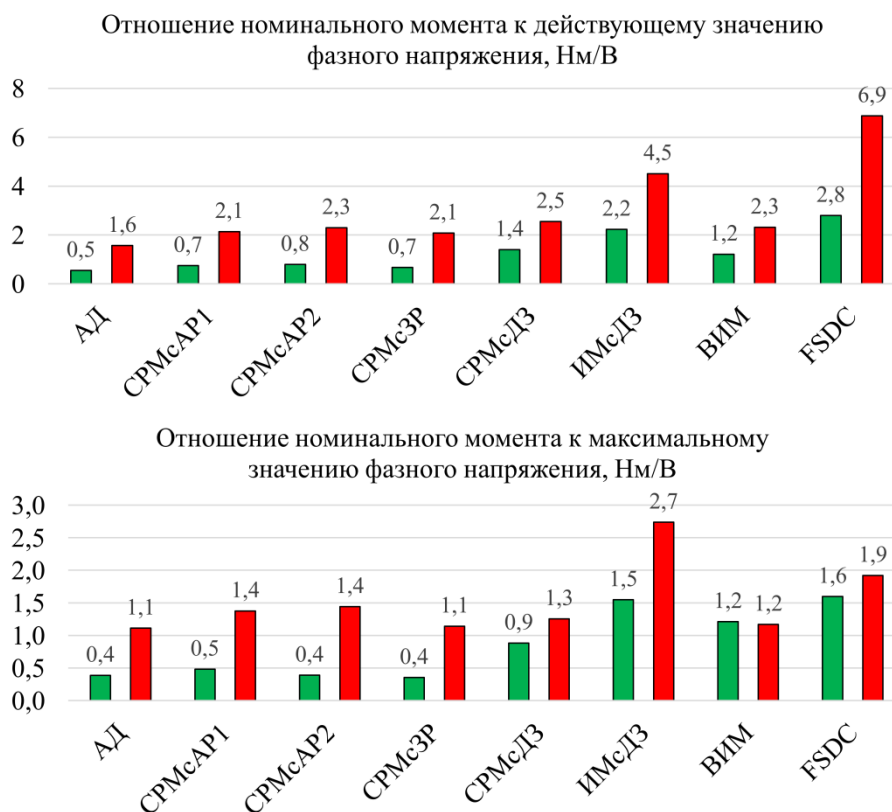


Рис. 2. Показатели электробезопасности при эксплуатации электрических машин: зеленые столбцы – номинальный режим работы; красные столбцы – 4-кратная перегрузка по току при номинальной скорости
 Fig. 2. Electrical safety indicators when operating motors: green = rated operating mode; red = 4 times overcurrent at rated speed

тели АД в 4–6 раз. В зоне перегрузок ухудшаются показатели СРМсДЗ, что связано с резким снижением момента. Лидером по показателю отношения момента к действующему значению фазного напряжения по-прежнему является FSDC (в 4 раза больше, чем у АД), а по показателю отношения момента к максимальному значению напряжения лидером стала ИМсДЗ (в 2,5 раза больше, чем у АД).

Оптимизация по величине питающего напряжения, которое необходимо для формирования требуемой временной диаграммы тока в фазных обмотках, не проводилось. Выдвигается научная гипотеза, что путем некоторого незначительного снижения эффективности электромеханического преобразования энергии можно существенно снизить величины параметров питающего напряжения. Дальнейшие исследования на конечно-элементных моделях в статических режимах по алгоритмам в [12] и на рис. 1, направленные на оптимизацию по критерию электробезопасности электрических машин, предполагают замену критерия оптимизации на отношение электромагнитного момента к действующему значению индукции в зазоре. При вычислении напряжения действующее значение индукции в зазоре будет пропорционально действующему значению напряже-

ния. Уменьшение действующего значения фазного напряжения в большей степени, нежели момента, приведет к повышению электробезопасности при эксплуатации синхронных реактивных и индукторных электрических машин, а также снизит потери в стали, что благоприятно скажется на тепловом состоянии изоляции обмоток.

Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Благодаря предлагаемому методу оптимизации удалось увеличить удельные показатели синхронных реактивных и индукторных электрических машин, к которым относятся удельный момент, КПД, коэффициент мощности, до теоретически возможного предела как при номинальной нагрузке, так и в зоне четырехкратной перегрузки по фазному току.

2. Показано, что удельный момент на единицу массы при равных потерях и тепловых состояниях синхронных реактивных и индукторных электрических машин в сравнении с аналогичным показателем АД в номинальном режиме лежит в диапазоне от –5 до 75 %, в режиме 4-кратной перегрузки по току – в диапазоне от –36 до 66 %. Показатели по действующему и максимальному напряжениям

для электрических машин рассматриваемого класса, чья скорость ротора сопоставима с аналогичным показателем АД, выше на 10–45 %. Это следует учитывать при проектировании для них электрического преобразователя, заложив соответствующие запасы по напряжению.

4. Показано, что по величине показателей отношения момента к действующему и максимальному напряжением синхронные реактивные и индукторные электрические машины превосходят

АД. Лидерами являются ИМСДЗ и FSDC, которые превосходят АД в 3–6 раз.

5. Предложен критерий оптимизации, равный отношению электромагнитного момента к действующему значению индукции в зазоре, который позволит, используя конечно-элементные модели и рассмотренный в статье метод оптимизации, получить оптимальные с точки зрения электробезопасности и потерь в стали синхронные реактивные и индукторные электрические машины.

Список литературы

1. Vagati A. Synchronous reluctance electrical motor having a low torque-ripple design. US patent 5818140 A.
2. Marongiu I., Vagati A., Improved modelling of a distributed anisotropy synchronous reluctance machine // Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Dearborn, MI, USA, 1991. Vol. 1. P. 238–243. DOI: 10.1109/IAS.1991.178161
3. Evaluation of torque ripple in high performance synchronous reluctance machines / A. Fratta, G.P. Troglia, A. Vagati, F. Villata // Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting. Toronto, ON, Canada, 1993. Vol. 1. P. 163–170. DOI: 10.1109/IAS.1993.298919
4. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Виноградов К.М. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // *Электричество*. 2007. № 3. С. 21–26.
5. 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
6. A new general design method of segmented rotor wound field flux switching motors with complementary magnet circuit / R. Cao, Y. Jin, Y. Zhang, W. Huang // 2015 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG). Beijing, China, 2015. Article ID: 4731. DOI: 10.1109/INTMAG.2015.7157601
7. A novel double-stator tubular vernier permanent-magnet motor with high thrust density and low cogging force / Z. Liu, W. Zhao, J. Ji, Q. Chen // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. Vol. 51, no. 7. Art. no. 8105807. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2389193
8. Drive for DC-biased sinusoidal current vernier reluctance motors with reduced power electronics devices / W. Kong, D. Jiang, R. Qu et al. // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Miami, FL, USA, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002092
9. A three phase model for transient overvoltage studies on electrical machines during sequential pole closure / J.L. Guardado, V. Venegas, E. Melgoza, K.J. Cornick // Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242). St. Louis, MO, USA, 1998. Vol. 3. P. 2292–2298. DOI: 10.1109/IAS.1998.730134
10. Исследование электрических характеристик и микроструктуры варисторов для ограничения пере-напряжений в кабельных сетях / А.В. Коржов, В.И. Сафонов, М.А. Дзюба и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 2. С. 46–54. DOI: 10.14529/power230204
11. Nickel (II)-Polysiloxane “Sandwiches” as Electrical Breakdown Protective Materials / K.V. Deriabina, M.A. Dziuba, A.A. Rashevskii et al. // *ACS Applied Polymer Materials*. 2023. Vol. 5 (1). P. 892–898. DOI: 10.1021/acsapm.2c01822
12. 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

References

1. Vagati A. Synchronous reluctance electrical motor having a low torque-ripple design. US patent 5818140 A.
2. Marongiu I., Vagati A., Improved modelling of a distributed anisotropy synchronous reluctance machine. In: *Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Dearborn, MI, USA. 1991. Vol. 1. P. 238–243. DOI: 10.1109/IAS.1991.178161
3. Fratta A., Troglia G.P., Vagati A., Villata F. Evaluation of torque ripple in high performance synchronous reluctance machines. In: *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*. Toronto, ON, Canada; 1993. Vol. 1. P. 163–170. DOI: 10.1109/IAS.1993.298919
4. Usynin Yu.S., Grigor'ev M.A., Vinogradov K.M. [Electric drives and generators with field regulated reluctance machine]. *Elektrichestvo*. 2007;(3):21–26. (In Russ.)
5. Faiz J., Finch J.W. Aspects of design optimisation for switched reluctance motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1993;8(4):704–713. DOI: 10.1109/60.260984

6. Cao R., Jin Y., Zhang Y., Huang W. A new general design method of segmented rotor wound field flux switching motors with complementary magnet circuit. In: *2015 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)*. Beijing, China; 2015. Article ID: 4731. DOI: 10.1109/INTMAG.2015.7157601
7. Liu Z., Zhao W., Ji J., Chen Q. A Novel Double-Stator Tubular Vernier Permanent-Magnet Motor with High Thrust Density and Low Cogging Force. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015;51(7):8105807. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2389193
8. Kong W., Jiang D., Qu R., Yu Z., Jia S., Jing L. Drive for DC-biased sinusoidal current vernier reluctance motors with reduced power electronics devices. In: *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. Miami, FL, USA; 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002092
9. Guardado J.L., Venegas V., Melgoza E., Cornick K.J. A three phase model for transient overvoltage studies on electrical machines during sequential pole closure. In: *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242)*. St. Louis, MO, USA; 1998. Vol. 3. P. 2292–2298. DOI: 10.1109/IAS.1998.730134
10. Korzhov A.V., Safonov V.I., Dzyuba M.A., Babayev R.M. o., Korostelev I.E., Zherebtcov D.A. Investigation of the electrical characteristics and microstructure of varistors to limit overvoltages in cable networks. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(2):46–54. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230204
11. Deriabin K.V., Dzyuba M.A., Rashevskii A.A. et al. Nickel (II)-Polysiloxane “Sandwiches” as Electrical Breakdown Protective Materials. *ACS Applied Polymer Materials*. 2023;5(1):892–898. DOI: 10.1021/acsapm.2c01822
12. 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

Информация об авторах

Горожанкин Алексей Николаевич, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gorozhankinan@susu.ru.

Максимов Никита Максимович, аспирант кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; maximovnm@susu.ru.

Ржавцев Леонид Андреевич, студент кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; rzavtsev@mail.ru.

Захаров Данила Дмитриевич, магистрант кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; zakharov633dd@gmail.com.

Information about the authors

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

Nikita M. Maksimov, Postgraduate Student of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; maximovnm@susu.ru.

Leonid A. Rzhavtsev, Student of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; rzavtsev@mail.ru.

Danila D. Zakharov, Master's Student of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; zakharov633dd@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 09.04.2024; одобрена после рецензирования 15.05.2024; принята к публикации 15.05.2024.

The article was submitted 09.04.2024; approved after review 15.05.2024; accepted for publication 15.05.2024.