

Повышение удельных характеристик асинхронных двигателей

КОНОНЕНКО К.Е., КОНОНЕНКО А.В., КРУТСКИХ С.В., МАНУКОВСКИЙ С.М.

Магнитную систему стандартного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором можно усовершенствовать методом параметрической оптимизации, улучшив эффективность электромеханического преобразования энергии и, как следствие, коэффициент полезного действия. Повышение энергоэффективности модернизированного двигателя не сопровождается увеличением материалоемкости либо себестоимости изготовления, так как применяются те же материалы и технология изготовления. Для получения указанного эффекта используется свойство асинхронного двигателя, при котором максимум его КПД можно найти только, если решать задачу распространения электромагнитного поля в нелинейной среде магнитопровода двигателя, которая имеет воздушный зазор двойной зубчатости со сложной конфигурацией. Для решения поставленной задачи используется численный метод расчета поля – метод конечных элементов. Работоспособность такого подхода экспериментально проверена на асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором мощностью 120 Вт до 7,5 кВт в двухполюсном и четырехполюсном исполнении обмотки статора.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, геометрия паза, электромагнитное поле, конечно-элементный анализ, электромагнитный момент, физический эксперимент

Актуальность вопроса. Асинхронные электродвигатели – основа автоматизированного электропривода в промышленности, строительстве, структурах ЖКХ и др. Повышение энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором снизит энергоемкость в указанных отраслях их применения и позволит получить реальную экономию углеводородного сырья, сжигаемого на электростанциях при выработке электроэнергии.

Оценка экономической целесообразности. Подобно тому, как внедрялось использование энергосберегающих осветительных ламп [1], важно добиться использования только энергоэффективных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. На их долю приходится 40% потребляемой в стране электроэнергии. Предлагаемый способ может обеспечить повышение КПД без увеличения себестоимости и материалоемкости во всем диапазоне мощностей в среднем не менее чем на 1%.

Для примера в 2013 г. в РФ произведено $1045 \cdot 10^9$ кВт·ч электроэнергии. Если оценить стоимость одного киловатт-ч в 4,5 руб., то эффект от повсеместного внедрения предлагаемого мероприятия составит $1045 \cdot 10^9 \cdot 0,40 \cdot 0,01 \cdot 4,5 = 18,81$ млрд руб.

Подчеркнем, среднее увеличение КПД на 1% это весьма консервативная оценка, результат может оказаться выше. Полученное значение характеризует объем экономии, который можно будет получить, если осуществить полный переход от стандартных электродвигателей к энергоэффективным.

С точки зрения производителя асинхронных двигателей явной экономии не прослеживается.

Гораздо интереснее положение обстоит с потребителями энергоэффективных асинхронных двигателей. Расчетами, основанными на теории электромагнитного поля, было показано, что получить прирост КПД в асинхронном двигателе мощностью 7,5 кВт на 2–2,5% вполне реально при тех же материалах и технологии изготовления. Эта цифра выглядит весьма скромно, однако за период эксплуатации двигателя позволяет получить экономию по расчетам за электроэнергию, равную двум-трем розничным ценам электродвигателя. А теперь снова вернемся к тому месту, где говорилось о слабой корреляции цены энергоэффективного асинхронного двигателя и экономии у производителя.

Грамотная работа отделов продаж с потребителями легко покажет заказчику целесообразность внедрения энергоэффективных изделий к взаимной выгоде производящей и потребляющей сторон.

Чем можно пояснить получаемые результаты. Теория асинхронной машины и в нашей стране, и за рубежом разработана основательно и подкреплена многолетним опытом производства [2–7]. В основе работы электрической машины лежат законы электромагнетизма и теории поля. Сложность решения дифференциальных уравнений в частных производных привела к известным допущениям идеализированной электрической машины [2–7]. До 2017 г. в нашей стране при проектировании и производстве асинхронных двигателей не приме-

нялся расчет поля на основе метода конечных элементов [8–10].

На рис. 1–5 показаны результаты модернизации асинхронного двигателя ДАК, анализируя которые можно сделать следующие утверждения. Применение метода конечных элементов (МКЭ) дает следующие преимущества. Можно рассчитать среднюю магнитную силовую линию, а не представлять ее геометрическими примитивами. Становится понятно, в какой степени картина поля в зазоре отличается от синусоиды (рис. 3 и 5).

В асинхронных машинах картина силовых линий и индукция в зазоре изменяются похожим образом, но двигатель ДАК был принят для иллюстрации многих полученных расчетов.

В режиме пуска говорить о синусоидальном распределении магнитного поля в воздушном зазоре машины вообще не стоит.

Выбором формы листа ротора удалось увеличить пусковой момент более чем на 52 % без ухудшения рабочих характеристик. В общем курсе

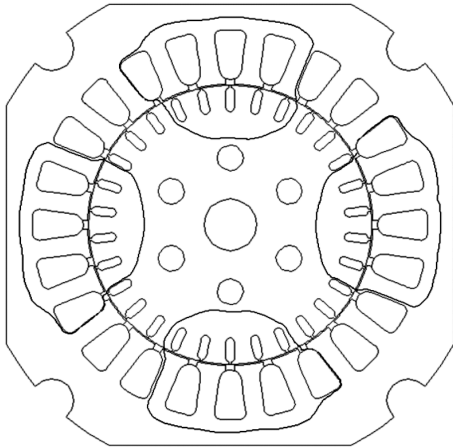


Рис. 1. Распределение средней силовой линии в номинальном режиме работы модернизированного электродвигателя

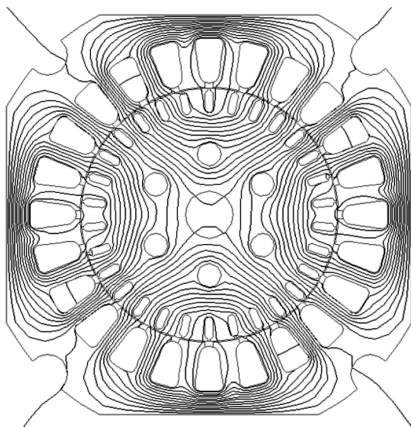


Рис. 2. Распределение силовых линий магнитного поля в ДАК-116 с 30 пазами на роторе в номинальном режиме

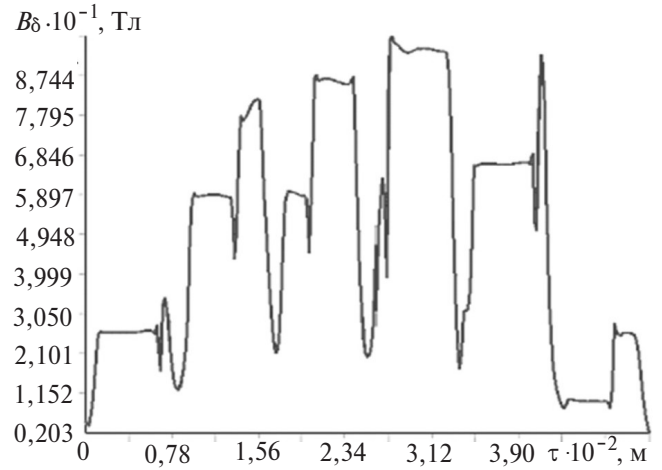


Рис. 3. Распределение вектора магнитной индукции в воздушном зазоре вдоль полюсного деления в номинальном режиме (ДАК-116 с 30 пазами)

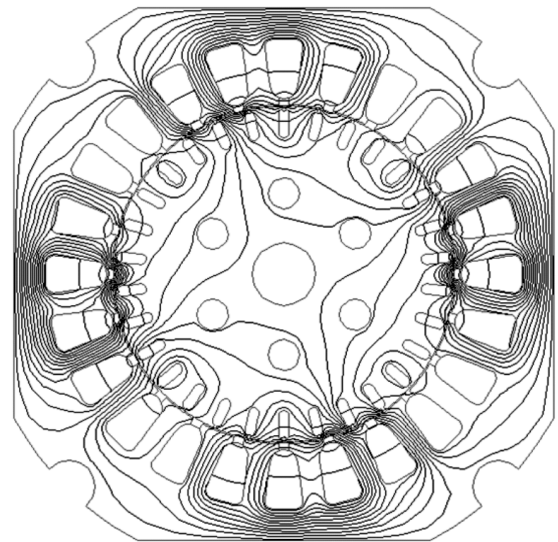


Рис. 4. Распределение силовых линий магнитного поля в ДАК-116 с 30 пазами на роторе в режиме пуска

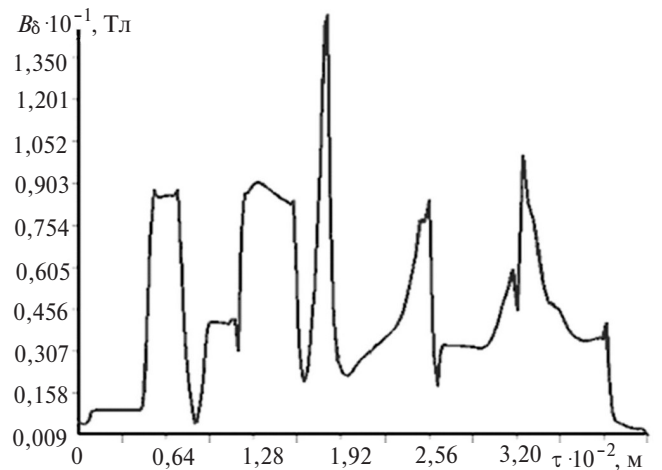


Рис. 5. Распределение вектора магнитной индукции в воздушном зазоре вдоль полюсного деления в режиме пуска (ДАК-116 с 30 пазами)

электрических машин нет объяснения, как можно поднять пусковой момент, не уменьшив значение момента в номинальном режиме.

Следующий рис. 6 считаем центральным для понимания того, как можно пояснить выбор пазов на роторе асинхронного двигателя.

По оси абсцисс откладывается число пазов на роторе, по оси ординат – электромагнитный вращающий момент асинхронного двигателя 4A132S4. В базовом варианте изделия, а это двигатель серии 4A, на роторе расположено 34 паза [7]. В литературе по проектированию можно найти множество рекомендаций того, сколько пазов на роторе следует принять в зависимости от числа пазов статора и числа полюсов обмотки двигателя. Поступим следующим образом. При моделировании задачи на компьютере можно принимать любое число полюсов. Предположим, что форма и площадь каждого паза соответствует справочнику [7]. Рассмотрим режим при номинальных значениях тока и скольжения. Как видно из рисунка, варьирование числом пазов было начато с числа 5 и закончено числом 42. При этом независимо от числа пазов на роторе, принятого для данного сочетания, пазы распределяются по ротору равномерно, т.е. чем меньше пазов, тем больше угол между ними. Для каждого числа пазов ротора расчет электромагнитного вращающего момента выполнялся в десяти положениях ротора при повороте его на 1° . Принималось среднее арифметическое значение электромагнитного момента. Другими словами, на графике приведены результаты расчета электромагнитного поля в асинхронном двигателе, которые повторили 380 раз! При расчетах площадь каждого паза, как и его форма, были неизменны. Из приведенного графика следует, что электромагнитный вращающий момент достигает максимума при 30 пазов на роторе. Видно, что можно удалить 4 паза и получить прирост электромагнитного момента или, уменьшив суммарный объем алюминия ротора, увеличить значение электромагнитного момента. Даже 22 паза на роторе не уступают базовому варианту в

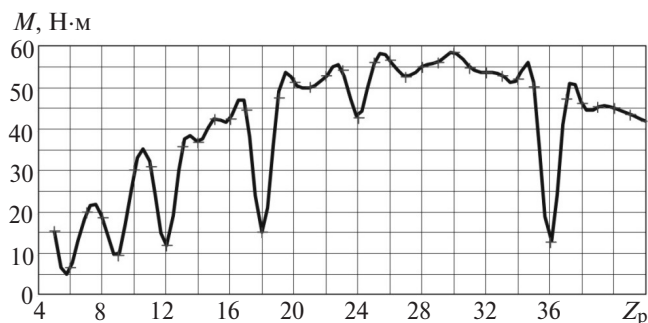


Рис. 6. Зависимость электромагнитного момента от числа пазов ротора Z_p при номинальном скольжении двигателя 4A132S4

34 паза, но это значительная экономия алюминия беличьей клетки.

Как можно трактовать тот факт, что при равном со статором числе пазов на роторе момент уменьшается в 4 раза. А это и есть так называемый эффект «залипания ротора». При таком числе пазов двигатель не может развивать мощность, даже близкую к номинальной. Еще есть одна характерная деталь – это число пазов на роторе, равное половине числа пазов на статоре. При этом значение момента практически такое же, как при «залипании». И еще одно наблюдение: момент больше в тех случаях, когда больше значение наименьшего общего делителя числа пазов ротора и статора.

Отметим, что на графике рис. 6 был показан режим с номинальным током и скольжением. Было бы интересно посмотреть, что будет с начальным пусковым значением момента. Расчеты для пускового режима при аналогичных изменениях числа пазов приведены на рис. 7.

Оценка полученного максимума графика рис. 6 в 22 паза дает и на рис. 7 существенный выигрыш по сравнению с базовым вариантом. А вот максимум момента для номинального режима и режима пуска достигается при разных числах пазов на роторе, что следует учитывать при проектировании. Оценка полученных результатов приводит к выводу: при проектировании ротора асинхронного двигателя важную роль играют площадь каждого паза и их число. Без учета этого вывода расчет числа пазов малоэффективен. Именно этим объясняется тот факт, что показатели энергоэффективности у всех серий после 4A практически одинаковые.

Множество расчетов, выполненных авторами, без физического эксперимента имели бы меньшее значение для практики создания электрических машин с повышенными удельными характеристиками.

Следующие рис. 8 и 9 иллюстрируют, как изменяется геометрия листа стандартного двигателя после параметрической оптимизации МКЭ.

Подчеркнем следующее: в данном случае для получения прироста удельного момента оказалось

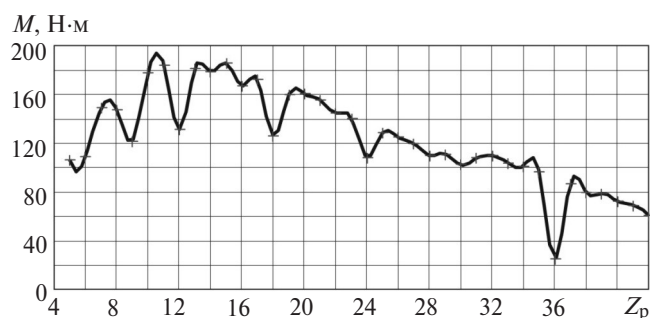


Рис. 7. Зависимость пускового момента от числа пазов ротора двигателя 4A132S4

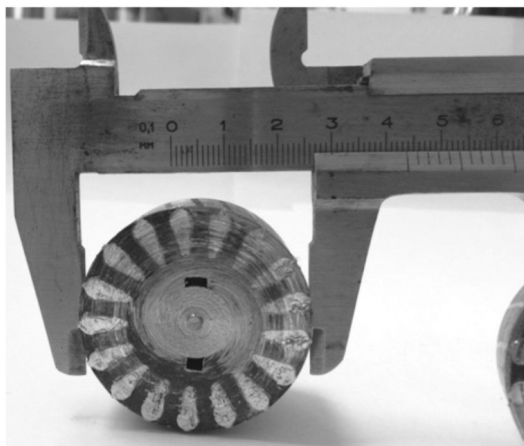


Рис. 8. Стандартный лист асинхронного двигателя

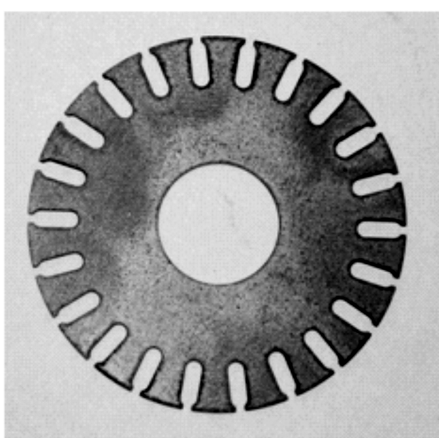


Рис. 9. Лист ротора асинхронного двигателя мощностью 120 Вт, КПД которого по сравнению со стандартным увеличен на 7%

целесообразным уменьшить площадь проводникового материала ротора. Так бывает особенно в машинах с высоким уровнем насыщения магнитной цепи.

Сформулируем основные результаты, полученные с помощью параметрической оптимизации магнитной системы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:

Увеличение КПД. Рассматривается диапазон мощностей асинхронных двигателей от 25 Вт до 150 кВт. Значение КПД будет увеличено на 1–7%. Причем большие его значения получены при оптимизации магнитопроводов асинхронных двигателей меньшей мощности. Результаты достигнуты за счет снятия допущений линейной теории проектирования асинхронной машины, которой пользуется большинство их производителей:

Мощность двигателя, кВт	Увеличение КПД, %
0,025–0,12	7
0,12–0,37	6
0,37–0,55	5
0,55–1,1	4
1,1–4,0	3

5,5–18,5	2
18,5–75	1,5
75–150	1

Повышение срока службы двигателей от двукратного до 1,33. Достигнутое увеличение КПД приводит к снижению температуры обмотки. Надежность изоляции обмотки чаще всего является фактором, сдерживающим повышение ресурса асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. До мощности двигателя включительно 0,55 кВт срок службы увеличен в два раза, свыше 0,55 кВт – до 100 кВт включительно, на одну треть.

Совершенствование сервис-фактора. В асинхронных двигателях с оптимизированной магнитной системой можно увеличить сервис-фактор до 1,3 или оставить стандартным (1,15), но без снижения срока службы изделия.

Снижение себестоимости оптимизированных асинхронных двигателей. Если в результате оптимизации не ставится задача повышения КПД электродвигателя, то можно, уменьшив размеры активной части электродвигателя, снизить его материалоемкость и себестоимость изготовления.

Увеличение пускового момента на 10–15%. Оптимизированные асинхронные двигатели по сравнению с остальными имеют больший на 10–15% начальный пусковой момент, что достигается за счет особенностей конструкции магнитопровода.

Отказ от скоса пазов. Применяемые способы параметрической оптимизации позволяют отказаться от скоса пазов. Это наделяет электродвигатель следующими положительными свойствами. На рис. 10 показаны две кривые, иллюстрирующие возможность повышения пускового момента увеличением активного сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора. Кривая 1 соответствует дви-

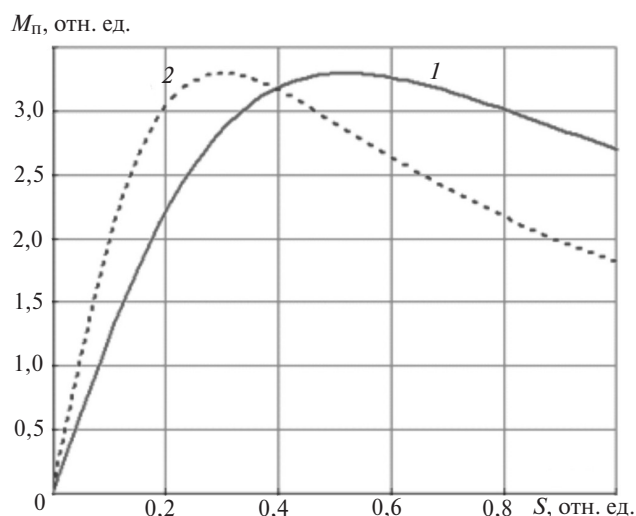


Рис. 10. Пример зависимости значения пускового момента и жесткости механической характеристики при корректировке сопротивления обмотки ротора

гателью с повышенным пусковым моментом, кривая 2 – стандартному.

При уменьшении активного сопротивления обмотки ротора, во-первых, увеличилась жесткость механической характеристики, во-вторых, уменьшилось номинальное скольжение, в-третьих, уменьшились электрические потери в обмотке ротора и, следовательно, увеличился КПД. Однако увеличение площади паза приведет к большему расходу алюминия клетки ротора. Это негативно скажется на стоимости проектируемой машины. Но если минимизировать реактивный момент, выбрав другое число пазов ротора и обеспечив при этом уменьшение приведенного активного сопротивления вторичной обмотки, то добиться увеличения КПД можно и при прежнем расходе материала. Влияние скоса пазов можно объяснить аналогичным способом. Скос пазов уменьшает потокоцепление обмоток статора и ротора, а значит, требует его компенсации увеличением габаритов машины. Умение проектировать двигатель без скоса пазов свободно от данного недостатка, тем более что в мощных двигателях скос пазов никогда не применяется.

Уменьшение массы алюминия в обмотке ротора в среднем на 5%. Параметрическая оптимизация асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором проводилась так, чтобы сбалансировать расходы обмоточных материалов.

Повышение надежности короткозамкнутого ротора. Оптимизированная конструкция ротора в большей мере, чем стандартная, обеспечивает устойчивость электродвигателя в целом к возможным дефектам одного из стержней.

Оптимизированная конструкция менее чувствительна к переключению схемы обмотки статора со звезды на треугольник и обратно. Температура обмотки оптимизированного двигателя ниже, появляется запас на возможное негативное влияние высших гармоник тока, замыкающихся по обмотке, соединенной треугольником.

Уменьшение тока между стержнем обмотки ротора и пакетом магнитопровода. Мерами конструктивного характера значение этого тока снижено, причем технология изготовления ротора не усложнена, а себестоимость его изготовления не увеличена.

Характеристики оптимизированных асинхронных двигателей с алюминиевым ротором приближены к характеристикам двигателей с медной клеткой.

Предлагаемые асинхронные двигатели более устойчивы к несимметрии питающего напряжения. Эту особенность им придает дополнительный запас

по превышению температуры обмотки над температурой окружающей среды.

Оптимизированные двигатели в большей мере предназначены для работы от статических преобразователей частоты. В предлагаемых двигателях имеется возможность в пазах статора разместить больше корпусной и витковой изоляции обмотки, что максимально улучшает свойства двигателя для совместной работы с преобразователем частоты, даже без выходного сглаживающего фильтра.

Сокращение общей длины двигателя. Если в результате оптимизации не ставится задача повышения КПД электродвигателя, то можно, снизив длину его активной части, уменьшить материалоемкость и себестоимость изготовления машины.

Дополнительное повышение пускового момента на 20%. Использование двойной клетки на роторе в оптимизированном двигателе позволит поднять значение начального пускового момента по сравнению с продукцией конкурентов.

Увеличение допустимого числа включений до 50%. Запас по температуре обмотки статора (по сравнению с аналогичными двигателями, представленными на рынке) позволяет увеличить допустимое число пусков без сокращения общего срока службы двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный закон** от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. **Костенко М.П., Пиотровский Л.М.** Электрические машины, ч. 2: Машины переменного тока. Учебник для студентов вузов. Л.: Энергия, 1973, 648 с.
3. **Петров Г.Н.** Электрические машины, ч. 2: Асинхронные и синхронные машины. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963, 416 с.
4. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1980, 928 с.
5. **Копылов И.П.** Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Логос, 2000, 607 с.
6. **Бойко Е.П., Ковалев Ю.М. и др.** Асинхронные двигатели общего назначения/ Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. М.: Энергия, 1980, 488 с.
7. **Кравчик А.Э. и др.** Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982, 504 с.
8. **Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л.** Метод конечных элементов и САПР/Пер. с франц. М.: Мир, 1989, 190 с.
9. **Сергерлинд Л.** Применение метода конечных элементов/Пер. с англ. М.: Мир, 1979, 392 с.
10. **Сильвестр П., Феррари Р.** Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков/Пер. с англ. М.: Мир, 1986, 229 с.

[22.06.2020]

А в т о р ы: Кононенко Константин Евгеньевич – доктор техн. наук, профессор кафедры электромеханических систем и электроснабжения Воронежского

государственного технического университета ВГТУ, диссертацию защитил в 2000 г.

Конonenko Анастасия Валентиновна – кандидат техн. наук, доцент кафедры электромеханических систем и электроснабжения ВГТУ.

Крутских Сергей Владимирович – кандидат техн. наук, генеральный директор ООО «PCO Энерго», диссертацию защитил в 2017 г.

Мануковский Сергей Михайлович – индивидуальный предприниматель.

Electrichestvo, 2020, No. 9, pp. 34–39

DOI:10.24160/0013-5380-2020-9-34-39

Improving the Specific Characteristics of Induction Motors

KONONENKO Konstantin Ye. (Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia) – Professor of Electromechanical Systems and Power Supply Dept., Dr. Sci. (Eng.)

KONONENKO Anastasiya V. (Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia) – Associate Professor of Electromechanical Systems and Power Supply Dept., Cand. Sci. (Eng.)

KRUTSKIKH Sergey V. (RSO Energo LLC, Voronezh, Russia) – General Director, Cand. Sci. (Eng.)

MANUKOVSKIY Sergey M. (Voronezh) – Individual Entrepreneur

The magnetic system of a standard induction motor with a squirrel-cage rotor can be improved using the parametric optimization method by achieving more efficient electromechanical energy conversion and, as a consequence, better efficiency. The improvement in the energy efficiency of the modernized motor does not entail an increase in the material intensity or net cost of its manufacture, because the same materials and the same manufacturing technology are applied. The above-mentioned effect is obtained by using the induction motor property with which the maximum of its efficiency can only be found by solving the problem of electromagnetic field propagation in the nonlinear medium of the motor magnetic core, which has a double-tooth air gap with a complex configuration. For solving the stated problem, the field is numerically calculated using the finite element method. The efficiency of such approach has experimentally been checked on squirrel case induction electric motors with capacities from 120 W to 7.5 kW in two-pole and four-pole stator winding versions.

Key words: induction electric motor, slot geometry, electromagnetic field, finite element analysis, electromagnetic torque, physical experiment

REFERENCES

1. **Federal'nyy zakon ot 23 noyabrya 2009 g. № 261-FZ «Ob energosberezhenii i povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdel'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii»** («On energy saving and increasing energy efficiency and on amendments to certain legislative acts Russian Federation»).

2. **Kostenko M.P., Piotrovskiy L.M. Elektricheskiye mashiny, ch. 2: Mashiny peremennogo toka: Uchebnik dlya studentov vuzov** (Electric machines, part 2: AC machines. A textbook for university students). L.: Energiya, 1973, 648 p.

3. **Petrov G.N. Elektricheskiye mashiny, ch. 2: Asinkhronnyye i sinkhronnyye mashiny** (Electric machines, part 2: Asynchronous and synchronous machines). M.; L.: Gosenergoizdat, 1963, 416 p.

4. **Ivanov-Smolenskiy A.V. Elektricheskiye mashiny: Uchebnik dlya vuzov** (Electric machines: Textbook for universities). M.: Energiya, 1980, 928 p.

5. **Kopylov I.P. Elektricheskiye mashiny: Uchebnik dlya vuzov** (Electric machines: Textbook for universities). M.: Logos, 2000, 607 p.

6. **Boyko Ye.P., Kovalev Yu.M. i dr. Asinkhronnyye dvigateli obshchego naznacheniya/Pod red. V.M. Petrova i A.E. Kravchika** (Asynchronous motors of general purpose/Ed. V.M. Petrov and A.E. Krawchik). M.: Energiya, 1980, 488 p.

7. **Kravchik A.E. i dr. Asinkhronnyye dvigateli serii 4A: Spravochnik** (Asynchronous motors series 4A: Handbook). M.: Energoatomizdat, 1982, 504 p.

8. **Sabonnad'yer Zh.-K., Kulon Zh.-L. Metod konechnykh elementov i SAPR/Per. s frants.** (Finite element method and CAD/Per. from French). M.: Mir, 1989, 190 p.

9. **Seegerlind L. Primeneniye metoda konechnykh elementov/Per. s angl.** (Application of the finite element method / Per. from English). M.: Mir, 1979, 392 p.

10. **Sil'vestr P., Ferrari R. Metod konechnykh elementov dlya radioinzhenerov i inzhenerov-elektrikov/Per. s angl.** (The finite element method for radio engineers and electrical engineers / Per. from English). M.: Mir, 1986, 229 p.

[22.06.2020]