

УДК 621.313.3

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.4.01

О.В. Тихонова, И.В. Малыгин, А.Т. Пластун

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЯКОРЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОЛЬЦЕВЫМИ ОБМОТКАМИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Асинхронный двигатель с кольцевыми обмотками (АДКО) – машина, предназначенная для переработки ядерных отходов, первый опытный образец которой был создан научной группой специалистов кафедры «Электротехника» УрФУ совместно с заводом «Уралэлектромаш» г. Каменск-Уральский. Преимуществом данного двигателя является устойчивость к высокому уровню радиации и температуры благодаря применению керамической изоляции для обмоток статора, однако испытания опытного образца показали, что максимальный и пусковой моменты двигателя оказались меньше требуемых техническим заданием, в связи с чем возникает необходимость поиска решений по улучшению параметров двигателя. **Цель исследования:** оценка влияния слоистой структуры сердечника статора АДКО на рабочий поток и поток рассеяния машины. Анализ электромагнитного ядра, проводимый в предыдущих исследованиях, свидетельствует о том, что особенность конструкции магнитной системы асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками приводит к появлению двух составляющих магнитного потока – осевой и радиальной, поэтому возникает необходимость рассматривать влияние слоистой структуры сердечника статора на магнитное сопротивление для осевой составляющей магнитного потока АДКО. Наличие оксидной или лаковой пленки, которой покрываются стальные листы сердечника статора, а также технологические зазоры между листами, вызванные опрессовкой сердечника во время изготовления, приводят к увеличению магнитного сопротивления, следовательно, к уменьшению рабочего магнитного потока в воздушном зазоре, пускового и максимального моментов двигателя. **Методы:** в качестве решения для уменьшения магнитного сопротивления в осевом направлении магнитного потока и улучшения выходных характеристик машины предлагается применение магнитного шунтирования в ядре статора. **Результаты:** проведено моделирование двигателя с кольцевыми обмотками с помощью специализированного прикладного программного пакета "ANSYS Maxwell", что позволяет оценить не только влияние слоистой структуры сердечника статора на осевую составляющую магнитного потока, но и эффективность применения магнитных шунтов, а также количественно рассчитать значения магнитного потока на каждом участке магнитной цепи и дать рекомендации по дальнейшему усовершенствованию конструкции двигателя. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при получении второго опытного образца АДКО с улучшенными механическими характеристиками.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, кольцевые обмотки, поток рассеяния, коэффициент рассеяния, ANSYS Maxwell.

O.V. Tikhonova, I.V. Malygin, A.T. Plastun

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE LAYERED ARMATURE STRUCTURE OF THE INDUCTION MOTOR WITH RING WINDINGS ON THE MAGNETIC FLUX DISTRIBUTION

The induction motor with ring windings (IMRW) is designed for the processing of nuclear waste, the first prototype of IMRW was created by a scientific group of the Department of Electrical Engineering of the Ural Federal University together with the "Uralelectromash" plant in Kamensk-Uralsky. The advantage of this motor is stability to high levels of radiation and temperature due to the use of ceramic insulation for the stator windings, but tests of the prototype showed that the maximum and starting moments of the engine are less than the required by the technical specifications, and therefore a search for solutions to improve engine parameters is necessary. **Purpose of the study:** assessment of the effect of the layered structure of the IMRW stator core on the operating flux and leakage flux of the machine. The analysis of the electromagnetic core showed that the design feature of the magnetic system of an induction motor with ring windings leads to the appearance of two components of the magnetic flux - axial and radial, thus it is necessary to consider the effect of the layered structure of the stator core on the magnetic resistance for the axial component of the magnetic flux. The oxide or varnish coating of the steel sheets of the stator core, as well as the technological gaps between the sheets caused by pressure testing of the core during manufacture, increase the magnetic resistance, therefore, reduce the working magnetic flux in the air gap, the starting and maximum moments of the engine. **Methods:** as a solution to reduce the magnetic resistance in the axial direction of the magnetic flux and improve the output characteristics of the machine, it is proposed to use magnetic shunting in the stator yoke. **Results:** Modeling a motor with ring windings using a "ANSYS Maxwell" was provided. It allows to evaluate not only the effect of the layered structure of the stator core on the axial component of the magnetic flux, but also the efficiency of using magnetic shunts, as well as to quantitatively calculate the values of the magnetic flux at each section of the magnetic circuit and give recommendations for further improvement of the engine design. **Practical relevance:** The results obtained can be used to obtain a second prototype ADCO with improved mechanical characteristics.

Keywords: induction motor, ring windings, linkage flux, linkage flux coefficient, ANSYS Maxwell.

Введение

Для электрических двигателей малой мощности, предназначенных для работы на предприятиях по переработке радиоактивных отходов, в патентах [1–2] предложен принцип создания перемещающегося вокруг оси вращения воображаемой цилиндрической поверхности равноименнополюсного магнитного поля путем размещения $2m$ катушек кольцевого типа и чередования геометрии магнитных масс различной конфигурации. Катушки кольцевого типа выбраны с целью минимизации и типизации углов изгиба изоляции обмоточного провода, а также с целью получения возможности нанесения дополнительной изоляции на провод в любом месте витка в процессе изготовления катушки при применении неорганической, например, керамической изоляции, как показано в [3–5].

Геометрические оси всех катушек кольцевого типа якорной многофазной обмотки совпадают между собой и осью вращения воображаемой поверхности, относительно которой создается перемещающееся разноименнополюсное магнитное поле, что отражено в [6]. Магнитные массы охватывают каждую из катушек и имеют различную конфигурацию, что также описано в [7]. На рис. 1, *а* показаны геометрические формы магнитных масс статора, размещение в пространстве и порядок их сопряжения для случаев, когда число пар полюсов равно единице, $p = 1$. На рис. 1, *б* показано размещение катушек фаз кольцевого типа относительно магнитных масс. Магнитная система ротора имеет классическое исполнение. На рис. 2 изображен опытный образец АДКО, разработанный на кафедре «Электрические машины» УрФУ совместно с заводом «Уралэлектромаш», г. Каменск-Уральский.

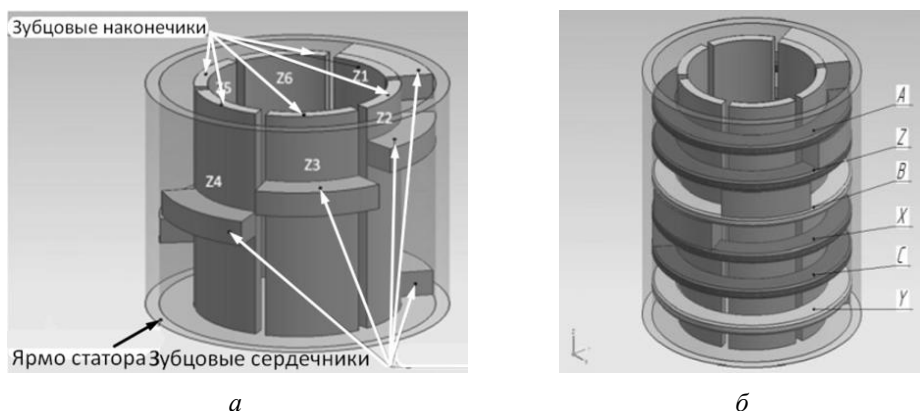


Рис. 1. Геометрические формы магнитных масс в пространстве и порядок их сопряжения при $p = 1$ (*а*); размещение катушек фаз кольцевого типа относительно магнитных масс (*б*)

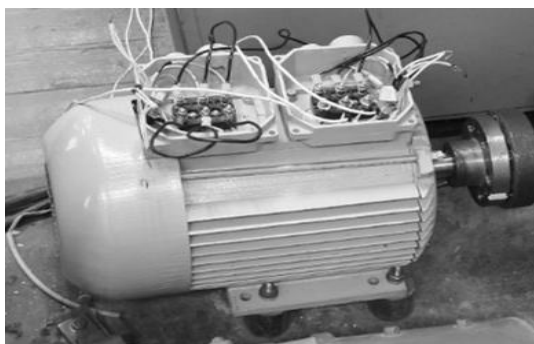


Рис. 2. Опытный образец АДКО

Для АДКО при любом числе пар полюсов минимальное число катушек трехфазной якорной обмотки с катушками кольцевого типа равно шести при построении шестидесятиградусной фазной зоны обмотки.

При разработке конструкции магнитной системы якоря опытного образца АДКО, назначение которого состояло либо в подтверждении, либо в опровержении принципов организации перемещающегося разноименнополюсного магнитного поля относительно ротора, разработчиком для уменьшения стоимости статора опытного образца была использована листовая лакированная электротехническая сталь марки Э 2211, толщиной 0,5 мм. Испытания опытного образца АДКО подтвердили справедливость принципов организации перемещающегося разноименнополюсного магнитного поля относительно ротора, что изложено в [8], и показали, что пусковой и максимальный электромагнитный моменты существенно меньше расчетных значений [9–13]. Это означает, что рабочий поток в машине меньше расчетного, а поток рассеяния больше расчетного.

Поскольку в ярме статора существует осевая составляющая потока рассеяния и рабочего потока, то из этого следует, что часть потока фазы идет поперек листа через лаковую поверхность и технологические зазоры, величина которых зависит от усилия опрессовки статора. Вышеописанная проблема вызывает необходимость учитывать увеличение магнитного сопротивления для осевой составляющей магнитного потока, которое связано с наличием оксидной пленки между листами шихтованного сердечника статора. Научная новизна проводимого исследования заключается в описании расчетных способов и алгоритмов действий, помогающих учесть и оценить влияние слоистой структуры сердечника статора АДКО на осевую составляющую магнитного потока машины, являющейся частью рабочего потока в зазоре, в то время как в двигателях классической конструкции, например серии 4А или АО, в данном учете нет необходимости, так как рабочий поток машины определяется главным образом радиальной составляющей.

Цель работы – оценить влияние слоистой структуры сердечника статора АДКО на рабочий поток и поток рассеяния машины.

Задачи проводимого исследования:

1) определить значение полного потока рассеяния двигателя типа АДКО, а также отдельных составляющих потока рассеяния;

2) определить коэффициент рассеяния магнитного потока двигателя типа АДКО и оценить значение рабочего потока машины по отношению к ее потоку рассеяния;

3) учесть влияние применяемой в опытном образце АДКО электротехнической стали и оксидной пленки между листами стали на осевую составляющую магнитного потока, сравнив варианты распределения потока для различных расчетных моделей АДКО;

4) дать рекомендации по дальнейшему совершенствованию конструкции двигателя типа АДКО.

Ход работы

Рассмотрим особенности распределения потока рассеяния и рабочего потока магнитной системы якоря опытного образца АДКО для принятой геометрии магнитной цепи и параметров обмотки якоря опытного образца, выполненного с числом пар полюсов $p = 3$ и $q = 1$, для трехфазного питания обмотки якоря, например, $I_C = I_{\max} = 5 \text{ А}$, $I_A = I_B = 2,5 I_{\max}$, для трех вариантов исполнения магнитной системы якоря:

1) в первом варианте исполнения магнитной системы якоря в расчетной модели АДКО прикладного программного пакета ANSYS Maxwell с целью определения возможных величин потока рассеяния, рабочего потока и коэффициента рассеяния при минимально возможном влиянии сопротивления магнитной цепи на указанные параметры и заданных значениях тока в фазах якоря магнитную проницаемость магнитной массы статора и ротора принимаем постоянной и равной $\mu_{ст} = 10^8$, коэффициент заполнения сталью принимается равным единице, $K_{з.с} = 1$ (отсутствуют технологические зазоры между листами электротехнической стали и изоляционные покрытия каждого из листов);

2) во втором варианте исполнения магнитной системы АДКО предполагается, что магнитная система яра статора, зубцовых сердечников и зубцовых наконечников выполнена из листов электротехнической стали марки Э 2211, причем таким образом, что листы яра статора и зубцовых наконечников направлены вдоль оси вращения, листы зубцовых сердечников направлены поперек оси вращения, отсутствуют зазоры в стыках между листами, для чего в первом приближении в расчетной модели статора и ротора АДКО прикладного

программного пакета ANSYS Maxwell с целью определения максимально возможных величин потока рассеяния, рабочего потока и коэффициента рассеяния допустить, что магнитная масса, образующая магнитную систему якоря, изотропна, а в качестве магнитного материала массы используется электротехническая сталь марки Э 2211;

3) в третьем варианте исполнения магнитной системы рассматривается конструкция магнитной системы опытного образца АДКО, в которой магнитная система ярма статора, зубцовых сердечников и зубцовых наконечников выполнена из листов электротехнической стали марки Э 2211, причем таким образом, что листы ярма статора и зубцовых сердечников направлены поперек оси вращения, листы зубцовых наконечников направлены вдоль оси вращения, отсутствуют зазоры в стыках между листами, в ярме якоря присутствуют дополнительные воздушные зазоры, имитирующие изоляционную лаковую пленку и наличие воздуха между отдельными листами сердечника статора, где толщина отдельно взятого листа составляет 0,5 мм.

С помощью пакета ANSYS Maxwell поток рассеяния фазы статора АДКО при заданных токах в фазах якоря можно определить двумя способами [14–15].

Первый способ

Этап № 1. Для расчетной модели АДКО с вынутым ротором с помощью встроенной в ANSYS Maxwell функции расчета потокосцепления фазы Ψ_{ϕ} определим потокосцепление фазы Ψ_{ϕ} для трех вариантов исполнения магнитной цепи якоря.

Этап № 2. Разделив значение потокосцепления Ψ_{ϕ} на число витков фазы W_{ϕ} , получим значение потока рассеяния фазы Φ_{σ} .

Как известно, значение потока рассеяния, определенное указанным способом, больше реального значения на несколько процентов и может быть скорректировано [16]. Однако на данном этапе исследования пренебрежем указанной погрешностью.

В то же время указанный подход в определении потокосцепления рассеяния не дает возможности рассчитать потоки рассеяния по участкам магнитной цепи, знание о которых позволяет определить участки с повышенными значениями потоков рассеяния и ввести коррекцию в геометрические размеры в магнитной цепи с целью уменьшения потока рассеяния фазы при проектировании [17–20].

Второй способ

Расчет потока в заданном сечении с помощью вспомогательной поверхности. Для определения положения вспомогательной поверхности в расчетной модели определим потоки рассеяния для каждой катушки обмотки якоря.

Суммарный поток рассеяния каждой катушки определим, как сумму потоков:

$$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma ZN} - \Phi_{\delta Zs} + \Phi_{\sigma л}, \quad (1)$$

где $\Phi_{\sigma ZN}$ – поток рассеяния зубцовых наконечников (рис. 3); $\Phi_{\sigma Zs}$ – поток рассеяния зубцовых сердечников (рис. 3); $\Phi_{\sigma л}$ – поток рассеяния лобовых частей катушки.

На рис. 3 приведены обозначения и направления потоков зубцового наконечника и зубцового сердечника.

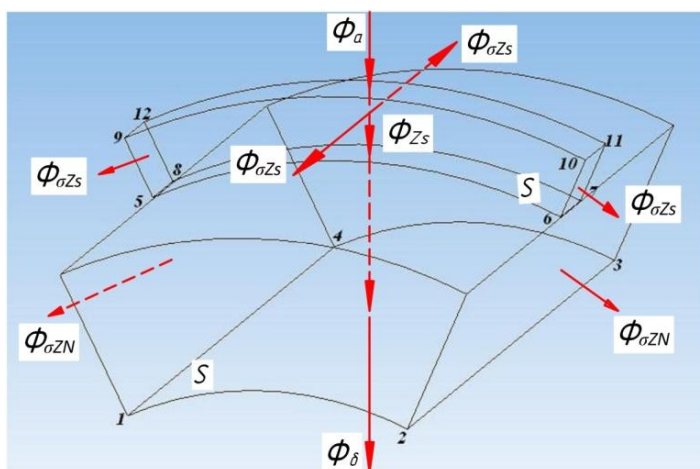


Рис. 3. Обозначения и направления потоков зубцового наконечника и зубцового сердечника

Согласно рис. 3 поток рассеяния зубцовых наконечников $\Phi_{\sigma ZN}$ можно определить как разность между потоком Φ_{Zs} , выходящим из зубцового сердечника, и потоком Φ_{δ} , выходящим в воздушный зазор:

$$\Phi_{\sigma ZN} = \Phi_{Zs} - \Phi_{\delta}, \quad (2)$$

Для вычисления потока Φ_{Zs} необходимо вспомогательную поверхность $S_{5,6,7,8}$ разместить в зоне сочленения зубцового сердечника и зубцового наконечника (см. рис. 7).

Согласно рис. 3 поток рассеяния зубцовых сердечников $\Phi_{\sigma Z_s}$ определим как разность между потоком Φ_a , выходящим из ярма, и потоком Φ_{Z_s} , выходящим из зубцового сердечника:

$$\Phi_{\sigma Z_s} = \Phi_a - \Phi_{Z_s}, \quad (3)$$

Для вычисления потока Φ_a необходимо вспомогательную поверхность $S_{9,10,11,12}$ разместить в зоне сочленения зубцового сердечника и ярма статора (см. рис. 3).

Часть потока рассеяния, непосредственно связанного с лобовыми частями обмотки, определим как разность между полным потоком рассеяния Φ_σ и потоками рассеяния зубцовых сердечников $\Phi_{\sigma Z_s}$, а также потоками рассеяния зубцовых наконечников $\Phi_{\sigma Z_N}$:

$$\Phi_\sigma = \Phi_\sigma - \Phi_{\sigma Z_s} - \Phi_{\sigma N}. \quad (4)$$

Полный поток рассеяния фазы обмотки статора Φ_σ есть разность между полным потоком фазы, рассчитанным с помощью ANSYS Maxwell, и потоком в зазоре Φ_δ :

$$\Phi_\sigma = \Phi_\phi - \Phi_\delta. \quad (5)$$

Поток в воздушном зазоре $\Phi_{\delta A, X}$, образованный катушками А и Х, на пару полюсов p , может быть рассчитан двумя способами:

- 1) с помощью вспомогательной поверхности;
- 2) как разность между полным потоком фазы $\Phi_{\phi A, X}$ и потоком рассеяния фазы Φ_σ , рассчитанными с помощью матриц:

$$\Phi_{\delta A, X} = \Phi_{\phi A, X} - \Phi_\sigma. \quad (6)$$

Для расчета потока в воздушном зазоре с помощью вспомогательной поверхности создадим на внешней стороне ротора, обращенной в воздушный зазор, дополнительную поверхность, ширина которой соответствует величине полюсного деления (рис. 4).

Расчет потока в воздушном зазоре, проходящего через вспомогательную поверхность, расположенную на роторе, выполняется путем интегрирования значения магнитной индукции через заданную площадь поверхности, как:

$$\Phi = \iint_S B \cdot dS = \iint_S (B \cdot \cos\alpha + B \cdot \cos\beta + B \cdot \cos\gamma) \cdot d(S), \quad (7)$$

где α , β , γ – углы между вектором магнитной индукции и вспомогательной поверхностью [21–23].

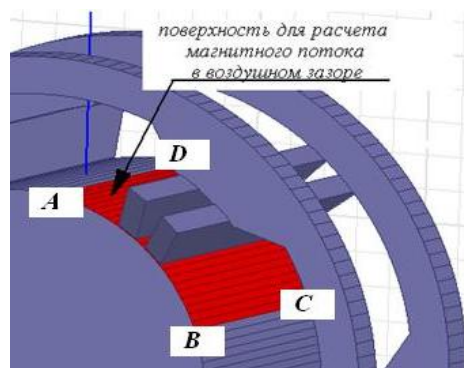


Рис. 4. Вспомогательная поверхность на роторе

Поток в воздушном зазоре $\Phi_{\delta A, X}$, образованный катушками А и Х на пару полюсов p , рассчитанный с помощью интегрирования по вспомогательной поверхности, определяется как $\Phi_{\delta A, X} = 1561$ мкВб.

Чтобы рассчитать поток в воздушном зазоре $\Phi_{\delta A, X}$ по второму методу, а именно как разность между полным потоком фазы Φ_{ϕ} и потоком рассеяния фазы Φ_{σ} , необходимо определить поток рассеяния фазы, выполнив расчет матриц индуктивностей при вынужтом роторе (рис. 5).

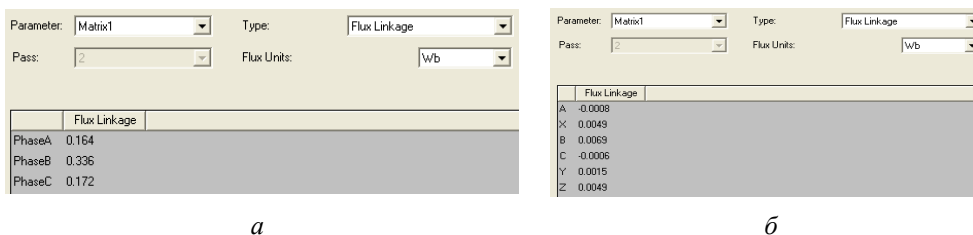


Рис. 5. Матричный расчет при значениях токов $I_B = 5$ А, $I_A = I_C = 2,5$ А, магнитной проницаемости стали $\mu_{ст} = 10^8$ и $K_{3,c} = 1$: а – потокоцеплений каждой фазы обмотки статора АДКО; б – потоков, приходящихся на один виток каждой катушки статора

С целью оценки количественного участия составляющих потоков рассеяния введем понятие коэффициента рассеяния магнитной системы якоря с кольцевыми обмотками k_{σ} [24–25].

Коэффициент рассеяния магнитной системы якоря с кольцевыми обмотками k_{σ} составим из трех составляющих, а именно из частичных коэффициентов рассеяния:

- 1) $k_{\sigma ZN}$ – частичный коэффициент рассеяния зубцовых наконечников;
- 2) $k_{\sigma ZS}$ – частичный коэффициент рассеяния зубцовых сердечников;
- 3) $k_{\sigma сл}$ – частичный коэффициент рассеяния лобовых частей обмотки статора.

Частичный коэффициент рассеяния зубцовых наконечников $k_{\sigma ZN}$ – это отношение магнитного потока рассеяния зубцовых наконечников Φ_{ZN} к потоку Φ_{δ} , выходящему в воздушный зазор, плюс единица:

$$k_{\sigma ZN} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma ZN}}{\Phi_{\delta}}. \quad (8)$$

Частичный коэффициент рассеяния зубцовых сердечников $k_{\sigma ZS}$ – это отношение магнитного потока рассеяния зубцовых сердечников $\Phi_{\sigma ZS}$ к потоку Φ_{δ} , выходящему в воздушный зазор, плюс единица:

$$k_{\sigma ZS} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma ZS}}{\Phi_{\delta}}. \quad (9)$$

Частичный коэффициент рассеяния лобовой части обмотки статора $k_{\sigma л}$ можно определить как отношение потока рассеяния лобовой части обмотки статора к потоку Φ_{δ} , выходящему в воздушный зазор, плюс единица:

$$k_{\sigma л} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma л}}{\Phi_{\delta}}. \quad (10)$$

Общий коэффициент рассеяния магнитной системы якоря с кольцевыми обмотками k_{σ} определим как сумму частных коэффициентов рассеяния, а именно: частного коэффициента рассеяния зубцовых наконечников $k_{\sigma ZN}$, частного коэффициента рассеяния зубцовых сердечников $k_{\sigma ZS}$ и частного коэффициента рассеяния лобовых частей $k_{\sigma л}$.

$$k_{\sigma} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi_{\delta}} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma ZN}}{\Phi_{\delta}} + 1 + \frac{\Phi_{\sigma ZS}}{\Phi_{\delta}} + 1 + \frac{\Phi_{\sigma л}}{\Phi_{\delta}} - 2. \quad (11)$$

Расчет параметров магнитной цепи якоря с кольцевыми обмотками будем проводить, как и ранее, для трех случаев:

1. По формулам (1)–(11) произведен расчет потоков и коэффициентов рассеяния магнитной системы якоря с кольцевыми обмотками при трехфазном питании обмотки статора АДКО $K_{3,с} = 1$, проницаемости стали постоянной и равной $\mu_{ст} = 10^8$, и результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения потоков, мкВб, и коэффициентов рассеяния АДКО при $I_A = 5$ А, $I_B = I_C = 2,5$ А; $K_{3,с} = 1$ и $\mu_{ст} = 10^8$

Запитываемая фаза	Φ_{ϕ}	Φ_{δ}	Φ_{ZN}	Φ_{Zs}	Φ_a	$\Phi_{\sigma ZN}$	$\Phi_{\sigma Zs}$	$\Phi_{\sigma л}$	Φ_{σ}	$k_{\sigma Z}$	$k_{\sigma Zs}$	$k_{\sigma л}$	k_{σ}
$I_A = 5$ А, $I_B = I_C = 2,5$ А	2833	2233	2035	2285	2370	250	85	265	600	1,11	1,04	1,12	1,27

2. Расчетные значения потоков, коэффициентов рассеяния магнитной цепи АДКО при трехфазном питании обмотки статора, $K_{3,c} = 1$, стали Э 2211, без учета слоистой структуры сердечника статора, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения потоков, мкВб, коэффициентов рассеяния магнитной цепи АДКО при $I_A = 5 \text{ A}$, $I_B = I_C = 2,5 \text{ A}$, $K_{3,c} = 1$ и стали Э 2211

Запитываемая фаза	Φ_ϕ	Φ_δ	Φ_{ZN}	Φ_{Zs}	Φ_a	$\Phi_{\sigma ZN}$	$\Phi_{\sigma Zs}$	$\Phi_{\sigma n}$	Φ_σ	$k_{\sigma ZN}$	$k_{\sigma Zs}$	$k_{\sigma n}$	k_σ
$I_A = 5 \text{ A}$, $I_B = I_C = 2,5 \text{ A}$	1174	562	722	943	1027	221	84	307	612	1,39	1,15	1,55	2,09

3. Расчетные значения потоков, коэффициентов рассеяния магнитной цепи АДКО при $I_A = 5 \text{ A}$, $I_B = I_C = 2,5 \text{ A}$, стали Э 2211, при учете слоистой структуры сердечника статора, сведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные значения потоков, мкВб, коэффициентов рассеяния магнитной цепи АДКО при $I_A = 5 \text{ A}$, $I_B = I_C = 2,5 \text{ A}$, стали Э 2211, при наличии дополнительных зазоров в ярме статора

Запитываемая фаза	Φ_ϕ	Φ_δ	Φ_{ZN}	Φ_{Zs}	Φ_a	$\Phi_{\sigma ZN}$	$\Phi_{\sigma Zs}$	$\Phi_{\sigma n}$	Φ_σ	$k_{\sigma ZN}$	$k_{\sigma Zs}$	$k_{\sigma n}$	k_σ
$I_A = 5 \text{ A}$, $I_B = I_C = 2,5 \text{ A}$	548	182	368,9	479,9	536,9	111	57	198	366	1,61	1,31	2,09	3,01

Из табл. 1–3 видно, что при учете слоистой структуры статора – учете лаковой/оксидной пленки, которой покрываются листы сердечника статора, технологических зазоров, наличие которых вызвано опрессовкой сердечника, поток в воздушном зазоре Φ_δ уменьшается в 3 раза по сравнению с моделью, где слоистая структура статора не учитывается. Уменьшение значения основного магнитного потока обуславливается увеличением магнитного сопротивления для осевой составляющей магнитного потока. В качестве решения данной проблемы – уменьшения магнитного сопротивления для осевой составляющей магнитного потока, увеличения рабочего магнитного потока и, как следствие, пускового и максимального моментов предлагается применение в ярме статора магнитного шунтирования (рис. 6).

Согласно [2] в ярме статора АДКО вырезаются пазы, в которые вставляются магнитные шунты, выполненные из листовой стали марки Э 2211, причем листы электротехнической стали укладываются вдоль оси вращения двигателя.

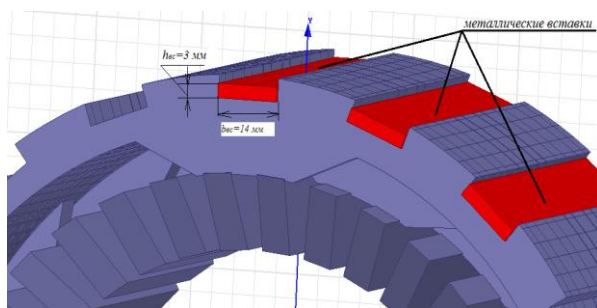


Рис. 6. Геометрические размеры и расположение магнитных шунтов в ярме статора

Расчетные данные магнитных потоков и коэффициентов рассеяния для модели двигателя, учитывающей слоистую структуру сердечника статора и применение магнитного шунтирования в ярме статора, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Расчетные значения потоков, мкВб, коэффициентов рассеяния магнитной цепи АДКО при $I_A = 5$ А, $I_B = I_C = 2,5$ А, стали Э 2211, при учете слоистой структуры сердечника статора и при применении магнитного шунтирования

Запитываемая фаза	Φ_ϕ	Φ_δ	Φ_{ZV}	Φ_{Zs}	Φ_a	$\Phi_{\sigma ZV}$	$\Phi_{\sigma Zs}$	$\Phi_{\sigma \text{эл}}$	Φ_σ	$k_{\sigma ZV}$	$k_{\sigma Zs}$	$k_{\sigma \text{эл}}$	k_σ
$I_A=5$ А, $I_B=I_C=2,5$ А	1105	510	698	819	935	120	116	359	595	1,24	1,23	1,7	2,17

Расчетные модели АДКО, параметры которых приведены в табл. 1–4, не учитывают влияние вихревых токов на характеристики двигателя, поэтому с целью проверки количественного изменения тех или иных характеристик двигателя в результате воздействия вихревых токов были рассмотрены значения потока рассеяния и основного магнитного потока опытного образца АДКО. Значения потоков, показанные в табл. 5, получены из результатов опытов холостого хода и короткого замыкания.

Таблица 5

Расчетные значения потоков, мкВб, коэффициента рассеяния магнитной цепи опытного образца АДКО при $I_A = 5$ А, $I_B = I_C = 2,5$ А, полученные из опытов холостого хода и короткого замыкания

Запитываемая фаза	Φ_ϕ	Φ_δ	Φ_σ	k_σ
$I_A=5$ А, $I_B=I_C=2,5$ А	529	69	460	7,67

С целью визуализации результаты расчетов, изложенные в табл. 1–5, представлены на рис. 7, где по оси абсцисс: 1 – значения потоков для расчетной модели АДКО при условии, что магнитная проницаемость стали статора и ротора $\mu_{ст} \leq \infty$, коэффициент заполнения магнитной системы сталью $K_{3,с} = 1$ (слоистая структура сердечника статора не учитывается); 2 – значения потоков для расчетной модели АДКО при условии, что магнитная проницаемость стали статора и ротора соответствует марке стали Э 2211, коэффициент заполнения магнитной системы сталью $K_{3,с} = 1$ (слоистая структура сердечника статора не учитывается); 3 – значения потоков для расчетной модели АДКО при условии, что магнитная проницаемость стали статора и ротора соответствует марке стали Э 2211, учитывается слоистая структура сердечника статора путем введения в модель дополнительных воздушных зазоров; 4 – значения потоков для опытного образца АДКО, учитывающего влияние вихревых токов; 5 – значения потоков для расчетной модели АДКО при условии, что магнитная проницаемость стали статора и ротора соответствует марке стали Э 2211, учитываются слоистая структура сердечника статора путем введения в модель дополнительных воздушных зазоров, а также магнитное шунтирование, применяемое в ярме статора.

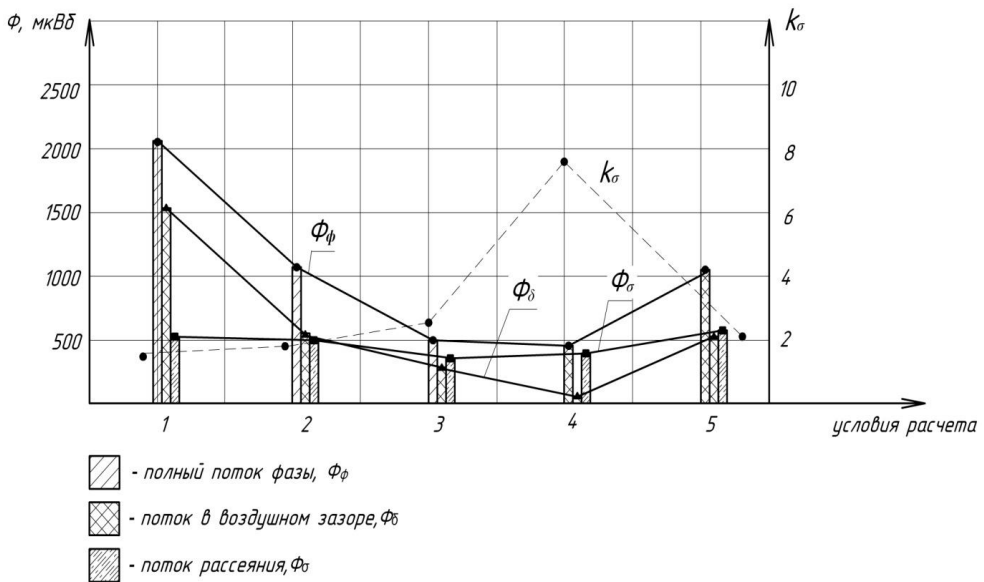


Рис. 7. Численные значения полного магнитного потока фазы Φ_ϕ , магнитного потока в воздушном зазоре Φ_δ , магнитного потока рассеяния Φ_σ при трехфазном питании обмотки статора: $I_A = 5 \text{ A}$, $I_B = I_C = 2,5 \text{ A}$

Заключение

Рассмотрев результаты исследований для четырех расчетных моделей магнитной системы АДКО, а также конструкцию опытного образца АДКО на предмет величины рабочего потока и потока рассеяния, можно сделать следующие выводы:

1) Если магнитная система статора и ротора выполнена из материала с постоянной магнитной проницаемостью, равной, например, $\mu_{ст}=10^8$ с изотропной структурой, то для принятой геометрии магнитных масс якоря АДКО и зазоров между ними поток рассеяния фазы Φ_{σ} и рабочий поток Φ_{δ} приближаются к максимально возможным значениям для данной геометрии магнитной цепи АДКО и заданных токах статора. Поток рассеяния фазы Φ_{σ} составляет 35 % от рабочего потока Φ_{δ} . Поток рассеяния зубцовых наконечников составляет 43,1 % от общего потока рассеяния, поэтому наиболее эффективным способом регулирования величины потока рассеяния является изменение высоты зубцового наконечника.

2) Если магнитная система ярма статора, зубцовых сердечников и зубцовых наконечников выполнена из листов электротехнической стали, например марки Э 2211, таким образом, что листы ярма статора и зубцовых наконечников направлены вдоль оси вращения, листы зубцовых сердечников направлены поперек оси вращения, отсутствуют зазоры в стыках между листами, то при той же геометрии магнитных масс, токах в катушках статора и величине воздушных зазоров, что и в первом случае, величина рабочего потока уменьшается и зависит от уровня насыщения элементов магнитной цепи. При глубоких уровнях насыщения и принятой геометрии магнитной цепи величина рабочего потока может равняться потоку рассеяния.

3) При учете слоистой структуры статора, вызванной наличием оксидной/лаковой изоляционной пленки, которой покрыты стальные листы сердечника, а также наличием технологических воздушных зазоров, возникающих из-за опрессовки сердечника во время изготовления, рабочий магнитный поток Φ_{δ} уменьшается в 3 раза по сравнению с режимом расчета, где слоистая структура сердечника не учитывается.

4) Под влиянием вихревых токов рабочий поток Φ_{δ} становится меньше потока рассеяния Φ_{σ} примерно в 7 раз, что видно из испытаний опытного образца АДКО.

5) Применение магнитного шунтирования в ярме статора помогает увеличить поток в воздушном зазоре Φ_{δ} в 2,8 раза, а значит, увеличить максимальный и пусковой моменты и приблизить их значения к требуемым по техническому заданию.

На основании проведенного исследования кафедры «Электротехника» УрФУ совместно с «Уралэлектромаш», г. Каменск-Уральский, занимается изготовлением второго опытного образца АДКО, где с целью уменьшения магнитного сопротивления для осевой составляющей магнитного потока используется магнитное шунтирование в ярме статора. Дальнейшие работы будут посвящены получению механических характеристик второго опытного образца АДКО и сравнению полученных данных с результатами испытаний первого опытного образца двигателя.

Библиографический список

1. Пат. № 2121207 Рос. Федерация, МПК⁶ H02K 1/16. Якорь многофазной электрической машины № 96111144/09 / А.Т. Пластун; заяв. Пластун А.Т.; заявл. 09.06.1996; опубл. 27.10.1998. – 10 с.

2. Пат. № 2684898 Рос. Федерация, МПК⁶ H02K 1/16, H02K 3/238. Якорь многофазной электрической машины: № 2018111892 / А.С. Бердичевский, А.Т. Пластун, О.В. Тихонова [и др.]; заявл. 02.04.2018; опубл. 16.04.2019; заяв. УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – 38 с.

3. Wu D., Lin L., Ren H. Thermal/vibration joint experimental investigation on lightweight ceramic insulating material for hypersonic vehicles in extremely high-temperature environment up to 1500 degrees C // *Ceramics International*. – July 2020. – № 10. – P. 14439–14447.

4. An L., Wang J., Petit D. An All-Ceramic, Anisotropic Flexible Aerogel Insulation Material // *Nano Letters*. – 13 May 2020. – № 5. – P. 3828–3835.

5. Получение керамических волокон на основе диоксида циркония с использованием вязкого материала / С.М. Титова, Н.В. Обабков, А.Ф. Закирова, В.С. Докучаев, И.Ф. Закиров // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. – 2019. – № 1. – С. 85–89.

6. Plastun A., Tikhonova O., Malygin I. Non-conventional rule of making a periodically varying different-pole magnetic field in low-power alternating current electrical machines with using ring coils in multiphase armature winding // IOP Conference Series: materials Science and Engineering. – 19 February 2018. – Vol. 313, iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/313/1/012002

7. Бакубаев Б.Т. Разработка асинхронного двигателя с асимметричным магнито-проводом с керамической изоляцией // Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты: тр. XV Междунар. конф. – Алушта, 2014. – С. 149–150.

8. Малыгин И.В. Исследование возможности применения трехфазного якоря с кольцевыми обмотками в электрических машинах малой мощности в условиях воздействия радиационных полей: специальность: 13.06.01 «Электро- и теплотехника»: дис. ... канд. техн. наук / Урал. федерал. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2019. – 179 с.

9. Tikhonova O., Malygin I., Plastun A. Electromagnetic calculation for induction motors of various designs by ANSYS Maxwell // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM); St. Petersburg, Russia; 16–19 May 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076294

10. Tikhonova O., Malygin I., Plastun A. Electromagnetic Torque Calculation of Induction Motor with Ring Windings by dint of ANSYS Maxwell // IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus); St. Petersburg, Russia; 1–3 February 2017. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910879

11. Tikhonova O., Plastun A. Electromagnetic Calculation of Induction Motor by ANSYS Maxwell // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus); St. Petersburg, Russia, 29 January – 1 February 2018. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317216

12. Tikhonova O., Malygin I., Plastun A. Calculation of Inductive Resistances of Induction Motor with Ring Windings by ANSYS Maxwell // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM); Moscow, Russia, 15–18 May, 2018. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728767

13. К анализу рабочих характеристик асинхронного двигателя с асимметричным магнитопроводом специального назначения / В.В. Сметанин, С.А. Саврулин, Т.С. Атаев, В.И. Денисенко, В.В. Лыткин // Материалы конф. молодых ученых УралЭНИН УрФУ. – Екатеринбург, 2018. – С. 1–4.

14. Тихонова О.В., Саидов Б.С., Пластун А.Т. Расчет потокоцеплений в зубцовых наконечниках и зубцовых сердечниках АДКО с керамической изоляцией // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: тр. междунар. конф. / Урал. федерал. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; Екатеринбург, 10–14 декабря 2018. – Екатеринбург, 2018.

15. Пластун А.Т. Расчет магнитной цепи асинхронного двигателя с асимметричным магнитопроводом // Электрические машины и электромашинные системы: сб. науч. трудов. – Пермь: Изд-во Перм. ГТУ, 2003. – С. 218–224.

16. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – 4-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.

17. Denisenko, V. I. Approach to the Leakage Conductance Calculation Method in Asynchronous Motor with Asymmetric Magnetic Core // Proceedings the 10th International Scientific and Practical Conference Modern Techniques and Technology. – Tomsk: TPU Press, 2004. – P. 72–73.

18. Loss Calculation of Induction Motor with Ring Windings by ANSYS Maxwell / O. Tikhonova, I. Malygin, R. Beraya, N. Sokolov, A. Plastun // Сб. трудов междунар. конф. АРЕЕТ / Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург, 2017.

19. An Analytical-Numerical Approach to Model and Analyse Squirrel Cage Induction Motors / A. Marfoli, L. Papini, P. Bolognesi, C. Gerada // EE Transactions on Energy Conversion. – 2021. – P. 421–430. DOI: 10.1109/TEC.2020.3007385

20. Simulation Calculation of Loss of Induction Traction Motor / N. Duan, X. Ma, S. Lu, S. Wang // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2020. – P. 599–606. DOI: 10.1007/978-981-33-6609-1_54

21. Shao J., Wen Y., Wang G. Magnetic Field Analysis of Linear Motor for High-Speed Maglev Train // IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization, NEMO 2020. – Gangzhou, December 2020. DOI: 10.1109/NEMO49486.2020.9343409

22. Transient analysis of the fault process of double Y-type three-phase asynchronous motor during open phase operation / H. Lu, C. Zhao, H. Shen, L. Duan // *Journal of Physics: Conference Series*. – Shanghai, November 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1684/1/012138

23. Huang Q., Luo L., Cao J. Investigation of Axial Flux Near-Wheel motor for Electric Vehicle // 9th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2020 ECCE Asia. – Nanjing, November 2020. – P. 2214–2221. DOI: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9368104

24. Analytical Calculations of Magnetic Fields Induced by MMF Spatial Harmonics in Multiphase Cage Rotor Induction Motors / H. Chen, J. Zhan, J. Zhao, S. Qu // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2021. – № 10. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3103643

25. Vassent E., Meunier G., Foggia A. Simulation of induction machines using complex magnetodynamic finite element method coupled with the circuit equations // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1991. – № 5. – P. 4246–4249. DOI: 10.1109/20.105039

References

1. Plastun A.T. Iakor' mnogofaznoi elektricheskoi mashiny [Anchor of a multiphase electric machine]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2121207 (1998).

2. Berdichevskii A.S., Plastun A.T., Tikhonova O.V. [et al.]. Iakor' mnogofaznoi elektricheskoi mashiny [Anchor of a multiphase electric machine]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2684898 (2019).

3. Wu D., Lin L., Ren H. Thermal/vibration joint experimental investigation on lightweight ceramic insulating material for hypersonic vehicles in extremely high-temperature environment up to 1500 degrees C. *Ceramics International*, July 2020, no. 10, pp. 14439-14447.

4. An L., Wang J., Petit D. An All-Ceramic, Anisotropic, and Flexible Aerogel Insulation Material. *Nano Letters*, 13 May 2020, no. 5, pp. 3828-3835.

5. Titova S.M., Obabkov N.V., Zakirova A.F., Dokuchaev V.S., Zakirov I.F. Poluchenie keramicheskikh volokon na osnove dioksida tsirkoniia s ispol'zovaniem viskoznoogo materiala [Obtaining ceramic fibers based on zirconium dioxide using viscose material]. *Vestnik Kontserna vozdushno-kosmicheskoi oborony "Almaz - Antei"*, 2019, no. 1, pp. 85-89.

6. Plastun A., Tikhonova O., Malygin I. Non-conventional rule of making a periodically varying different-pole magnetic field in low-power alternating current electrical machines with using ring coils in multiphase armature winding. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 19 February 2018, vol. 313, iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/313/1/012002

7. Bakubaev B.T. Razrabotka asinkhronnogo dvigatel'ia s asimmetrichnym magnito-provodom s keramicheskoi izoliatsiei [Design of induction motor with asymmetrical core with ceramic insulation]. *Trudy XV Mezhdunarodnoi konferentsii "Elektromekhanika, elektrotekhnologii, elektricheskie materialy i komponenty"*. Alushta, 2014, pp. 149-150.

8. Malygin I.V. Issledovanie vozmozhnosti primeneniia trekhfaznogo iakoria s kol'tsevymi obmotkami v elektricheskikh mashinakh maloi moshchnosti v usloviakh vozdeistviia radiatsionnykh polei: spetsial'nost' [Investigation of the possibility of using a three-phase armature with ring windings in low-power electric machines in conditions of exposure to radiation fields]. Ph. D thesis. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2019, 179 p.

9. Tikhonova O., Malygin I., Plastun A. Electromagnetic calculation for induction motors of various designs by ANSYS Maxwell. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Saint Petersburg, Russia, 16-19 May 2017*. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076294

10. Tikhonova O., Malygin I., Plastun A. Electromagnetic Torque Calculation of Induction Motor with Ring Windings by dint of "ANSYS Maxwell". *2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRus), St. Petersburg, Russia, 1-3 February 2017*, DOI: 10.1109/EIconRus.2017.7910879

11. Tikhonova O., Plastun A. Electromagnetic Calculation of Induction Motor by "ANSYS Maxwell". *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg, Russia, 29 January-1 February 2018*, DOI: 10.1109/EIconRus.2018.8317216

12. Tikhonova O., Malygin I., Plastun A. Calculation of Inductive Resistances of Induction Motor with Ring Windings by ANSYS Maxwell. *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, Russia, 15-18 May, 2018*, DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728767

13. Smetanin V.V., Savrulin S.A., Ataev T.S., Denisenko V.I., Lytkin V.V. K analizu rabochikh kharakteristik asinkhronnogo dvigatel'ia s asimmetrichnym magnitoprovodom spetsial'nogo naznacheniiia [About analyze of induction motor parameters with special asymmetrical core]. *Materialy konferentsii molodykh uchenykh Ural'skogo energeticheskogo instituta UrFU*. Ekaterinburg, 2018, pp. 1-4.

14. Tikhonova O.V., Saidov B.S., Plastun A.T. Raschet potokostseplenii v zubtsovykh nakonechnikakh i zubtsovykh serdechnikakh ADKO s keramicheskoi izoliatsiei [Flux linkages calculation in tooth tips and tooth cores in IMRW with ceramic insulation]. *Energo- i resursoberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovliaemye istochniki energii. Atomnaia energetika. Trudy mezhdunarodnoi konferentsii*, 10-14 December 2018. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2018.

15. Plastun A.T. Raschet magnetnoi tsepi asinkhronnogo dvigatel'ia s asimmetrichnym magnitoprovodom [Magnetic circuit calculation of induction motor asymmetrical core]. *Elektricheskie mashiny i elektromashinnye sistemy. Sbornik nauchnykh trudov*. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2003, pp. 218-224.

16. Zherve G.K. Promyshlennye ispytaniia elektricheskikh mashin [Industrial testing of electrical machines]. 4nd ed. Leningrad: Energoatomizdat, 1984, 408 p.

17. Denisenko V.I. Approach to the Leakage Conductance Calculation Method in Asynchronous Motor with Asymmetric Magnetic Core. *In Proceedings The 10th International Scientific and Practical Conference Modern Techniques and Technology*. Tomsk: TPU Press, 2004, pp. 72-73.

18. Tikhonova O., Malygin I., Beraya R., Sokolov N., Plastun A. Loss Calculation of Induction Motor with Ring Windings by ANSYS Maxwell. *Sbornik trudov mezhdunarodnoi konferentsii APEET*. Ekaterinburg, Ural'skii federal'nyi universitet, 2017.

19. Marfoli A., Papini L., Bolognesi P., Gerada C. An Analytical-Numerical Approach to Model and Analyse Squirrel Cage Induction Motors. *EE Transactions on Energy Conversion*, 2021, pp. 421-430, DOI: 10.1109/TEC.2020.3007385

20. Duan N., Ma X., Lu S., Wang S. Simulation Calculation of Loss of Induction Traction Motor. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2020, pp. 599-606. DOI: 10.1007/978-981-33-6609-1_54

21. Shao J., Wen Y., Wang G. Magnetic Field Analysis of Linear Motor for High-Speed Maglev Train. *IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization, NEMO 2020*. Gangzhou, December 2020. DOI: 10.1109/NEMO49486.2020.9343409

22. Lu H., Zhao C., Shen H., Duan L. Transient analysis of the fault process of double Y-type three-phase asynchronous motor during open phase operation. *Journal of Physics: Conference Series*. Shanghai, November 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1684/1/012138

23. Huang Q., Luo L., Cao J. Investigation of Axial Flux Near-Wheel motor for Electric Vehicle. *9th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2020 ECCE Asia*. Nanjing, November 2020, pp. 2214-2221. DOI: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9368104

24. Chen H., Zhan J., Zhao J., Qu S. Analytical Calculations of Magnetic Fields Induced by MMF Spatial Harmonics in Multiphase Cage Rotor Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, no. 10. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3103643

25. Vassent E., Meunier G., Foggia A. Simulation of induction machines using complex magnetodynamic finite element method coupled with the circuit equations. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, no. 5, pp. 4246-4249. DOI: 10.1109/20.105039

Сведения об авторах

Тихонова Ольга Валерьевна (Екатеринбург, Россия) – ассистентка кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: olga_tihonova_91@mail.ru).

Малыгин Игорь Вячеславович (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: mitrael_1@mail.ru).

Пластун Анатолий Трофимович (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, ул. Мира, 19, e-mail: a.t.plastun@urfu.ru).

About the authors

Olga V. Tikhonova (Yekaterinburg, Russian Federation) – Assistant Department of Electrical Engineering Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Yekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: olga_tikhonova_91@mail.ru).

Igor V. Malygin (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Engineering Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Yekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: mitrael_1@mail.ru).

Anatoliy T. Plastun (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Electrical Engineering Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Yekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: a.t.plastun@urfu.ru).

Получено 25.10.2021