

МАШИНЫ С ОБМОТКАМИ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ — ОДИН ИЗ ПУТЕЙ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Грачев П.Ю., Базаров А.А., Табачинский А.С.
Самарский государственный технический университет, Самвра, Россия
pgrachov.mail.ru

Аннотация — Решение проблемы повышения энергоэффективности в промышленности невозможно без повышения энергоэффективности электрических машин. Статья посвящена путям решения проблемы повышения КПД и снижения массо-объемных показателей электромеханических преобразователей с вентильным управлением. Она включает описание особенностей выполнения компактных обмоток якоря коддекторных машин и обмоток статора машин переменного тока, в частности – асинхронных машин с короткозамкнутым ротором. Показано, как влияют изменения конструкции обмоток статора на электрические и тепловые процессы в машинах. При построении компьютерных моделей за основу принят метод конечных элементов.

Ключевые слова — электрическая машина, компактная обмотка, эффективность, метод конечных элементов

I. ВВЕДЕНИЕ

Важная проблема повышения энергоэффективности электромеханических преобразователей часто решается выбором эффективных алгоритмов управления, обеспечивающих качество процессов в системе и экономичность электрооборудования, без изменения структуры силового преобразователя [1].

В последнее время на Урале ведутся разработки, направленные на изменения конструкции электрических машин с целью повышения их энергоэффективности и снижения массо-объемных показателей, например, [2,3].

Для гибридных автомобилей в Японии разработана специальная конструкция статора электрической машины. Она позволяет, за счет выполнения обмотки специальной конструкции из провода прямоугольного сечения, уменьшить вылет лобовых частей этой обмотки и уменьшить расход меди [4].

Еще большего повышения эффективности при снижении габаритов автономных силовых установок, в частности, гибридных автомобилей и электромобилей, можно достичь, объединением многофазного вентильного преобразователя с многополюсной машиной. В Германии предложено выполнять машину переменного тока с короткозамкнутой статорной обмоткой, а также вентильным преобразователем на статоре (интеллектуальный статор). Электропривод на базе такой машины позволяет в процессе работы

изменять число полюсов машины, что улучшает энергетические характеристики силового преобразователя. Однако к недостаткам такого электропривода следует отнести возможность работы только при очень низких напряжениях [5].

В Самаре также ведутся работы по созданию интегрированных силовых преобразователей для гибридных автомобилей, ветростанций и микро-ГЭС [6]. Существенно снижают массо-объемные показатели электромеханических преобразователей, при хороших энергетических характеристиках, разработанные в Самарском техническом университете конструкции машин со значительно уменьшенным вылетом лобовых частей обмоток, - с новыми компактными обмотками, с циклически изменяющимся прямоугольным сечением проводников витков [7,8,9].

В проводниках обмоток с изменяющимся сечением проводников наблюдается неравномерное распределение плотности токов вблизи участков с уменьшенным сечением проводников [10]. Результаты исследования этого явления с помощью метода конечных элементов, позволившие разработать конструкции сокращающие объем меди машин [11], а также оценить влияние этого явления на величину активных сопротивлений обмоток, рассмотрены в настоящем докладе.

Доклад также включает описание особенностей выполнения компактных обмоток машин постоянного и переменного тока, в частности – якорных обмоток и обмоток статора асинхронных машин. Значительное внимание уделено результатам исследований тепловых процессов в машинах с новыми компактными обмотками, лобовые проводники которых не пересекаются, а сечение проводников витков циклически изменяется.

II. СТАТОР МАШИНЫ С ОБМОТКОЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Рассмотрим особенности конструкции статора с такой обмоткой. Статор (рис.1) имеет трехфазную обмотку с проводниками прямоугольного сечения. Фаза обмотки состоит из трех ветвей. Лобовые части этой компактной обмотки включают проводники, параллельные торцевым поверхностям сердечника

статора. Площадь сечения перемычек между этими проводниками и активными проводниками в пазах меньше площади сечения остальных проводников. Поэтому лобовые проводники не пересекаются [8].

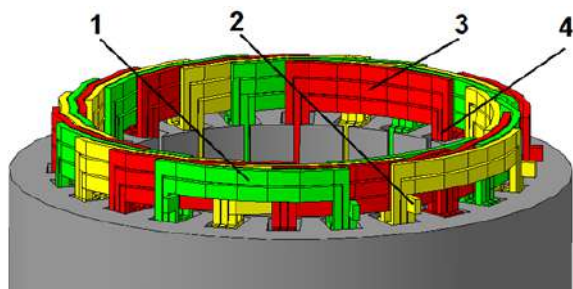


Рис. 1. Лобовые части компактной обмотки

Представленная на рис.1 торцевая часть статора с компактной обмоткой, включает выходы фаз обмотки. Представлен вариант выполнения волновой обмотки с диаметральной шагом и последовательным соединением ветвей. Рассмотрим отдельные группы проводников лобовой части обмотки. Проводники группы 1, расположенные со стороны спинки статора, соединяют ветви фаз обмотки. Выводы фаз 2 соединены с активными проводниками верхнего слоя обмотки. Проводники группы 3 (вблизи воздушного зазора машины) соединяют полуветви фаз обмотки. Остальные группы лобовых проводников, соединяют активные проводники витков. Площадь сечения перемычек 4, между активными и лобовыми проводниками, вдвое меньше площади сечения остальных проводников. Такое выполнение обмотки статора существенно уменьшает вылет ее лобовых частей.

Вторая торцевая часть статора с компактной обмоткой не содержит соединений ветвей и выводов фаз. И форма групп лобовых проводников этой части не зависит от типа соединения ветвей. Лобовые группы включают только проводники, соединяющие активные проводники витков обмотки. Площадь сечения перемычек здесь также вдвое меньше площади сечения остальных проводников. В этой торцевой части статора также существенно сокращён вылет лобовых частей.

За счет уменьшения длины проводников снижаются потери в обмотке статора, возрастает КПД. Уменьшение вылета лобовых частей компактных обмоток снижает длину машины, что особенно важно при ограниченном объеме моторных отсеков гибридных автомобилей и генераторных отсеков ВЭУ. Однако, уменьшение площади сечения перемычек компактных обмоток приводит к изменению электрических и тепловых процессов в статоре машины [11]. Особенно важно исследовать эти процессы при перегрузках, например, при запуске ДВС гибридных автомобилей.

III. Машины с новой обмоткой якоря

На рис.2 показана эскизная компоновка коллекторной электрической машины с новой конструкцией обмотки якоря [12]. В корпусе 1 расположен индуктор машины 2, создающий неподвижное магнитное поле.

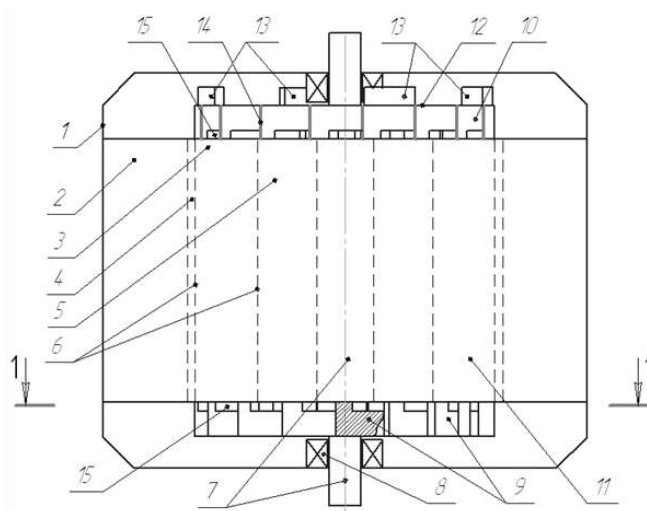


Рис. 2. Эскизная компоновка коллекторной электрической машины с обмоткой якоря переменной сечения

Он выполнен в виде ярма и полюсов с катушками обмотки возбуждения. Якорь 3 машины, отделенный от индуктора 2 воздушным зазором 4, включает сердечник якоря 5, с пазами 6 (ограничены пунктиром). Якорь расположен на валу 7 и может вращаться в подшипниках 8. Двухслойная обмотка якоря включает лобовые проводники 9 и 10, изолированные друг от друга и расположенные в торцевых зонах якоря (показано сечение одного из проводников), которые соединяют активные проводники 11 обмотки, расположенные в пазах 6. Лобовые проводники 9 находятся в нижней торцевой зоне, а лобовые проводники 10 расположены в верхней торцевой зоне якоря машины.

При этом, части лобовых проводников 10, выполнены в виде контактных секций 12 узла токосъема с ровными гладкими поверхностями, которые в совокупности образуют плоскую поверхность скользящего (щеточного) контакта. Узел токосъема на рис.2 включает щетки 13, например, углеграфитовые. Изоляция 14 между контактными секциями 12 узла токосъема является частью изоляции между лобовыми проводниками 10. Воздушный зазор 15 улучшает охлаждение лобовых проводников 9 и 10.

На рис. 3 показана схема обмотки якоря такой коллекторной электрической машины, соответствующая эскизной компоновке, представленной на рис.2.

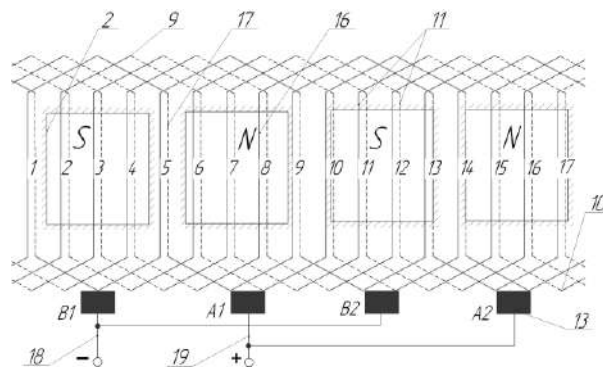


Рис.3. Схема обмотки якоря коллекторной машины с проводниками переменной сечения

Эта четырехполюсная волновая стержневая обмотка с $2p = 4$, $Z = Z_э = S = K = 17$, $y_1 = 4$, $y_2 = 4$, $y_k = 8$. Обозначены полюса N, S индуктора 2. В семнадцати пазах якоря расположены активные проводники 11 (стержни) обмотки. Сплошными вертикальными линиями обозначены стержни 16 верхнего слоя, а пунктиром – стержни 17 нижнего слоя обмотки. На рис.3 показаны также лобовые проводники 9, а также лобовые проводники 10 с контактными секциями 12 (по рис.2) узла токосъема, по которым скользят щетки 13. Выводы щеток A1 и A2, а также B1 и B2 объединены и подключены к шинам 24, 25 источника.

На рис. 4 показан вид сверху (по рис.2) якоря предложенной коллекторной машины.

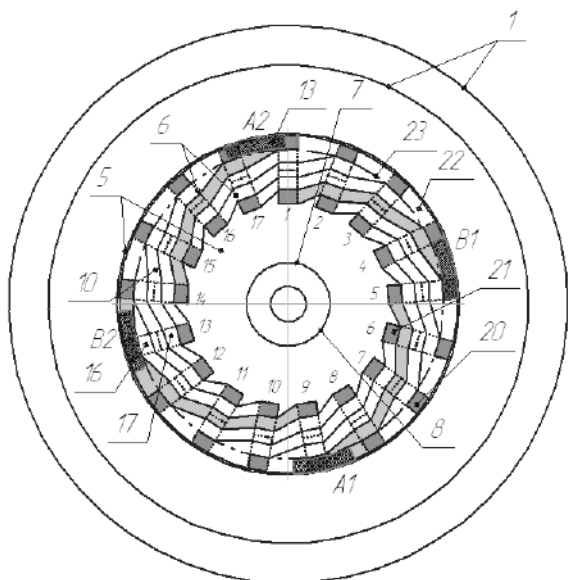


Рис.4. Торцевая зона якоря предложенной коллекторной машины

Корпус 1 как бы прозрачен. Паза 6 сердечника 5 пронумерованы по его торцевой поверхности. В этих пазах прямоугольной формы расположены стержни 16 и 17, соответственно верхнего и нижнего слоев обмотки (по рис.2). Они соединены лобовыми проводниками 10. Как видно на рис.4, места соединения 20, 21 лобовых проводников 10 с активными проводниками 16, 17 обмотки якоря 3, имеют площади поперечного сечения (отмечены серым цветом) меньше усредненных по длине пазов площадей поперечного сечения соединяемых активных проводников 16, 17. При постоянстве площади сечения стержней, как следует из рис. 4, эти площади составляют $2/5$ площади поперечного сечения стержней. Как следует из рисунка, места соединения 20, 21 расположены у краёв торцевой поверхности зубцово-пазовой зоны якоря, которая представляет собой совокупность зубцов и пазов сердечника 5 с активными проводниками 16, 17 обмотки якоря. Понятие «зубцово-пазовая зона» использует, например, Инкин А.И. при рассмотрении электромагнитных полей и параметров электрических машин [13].

На рис.4 показано, что часть каждого лобового проводника 10, выполнена в виде контактной секции 12 узла токосъема с ровными гладкими поверхностями 22, которые в совокупности образуют плоскую поверхность

скользящего (щеточного) контакта, расположенную между штрихпунктирной окружностью 23 и внешними границами лобовых проводников 10. Щетки 13 узла токосъема, выделенные штриховкой, прижаты к этой поверхности.

На рис.5 представлен вид сечения коллекторной машины 1-1 по рис.2.

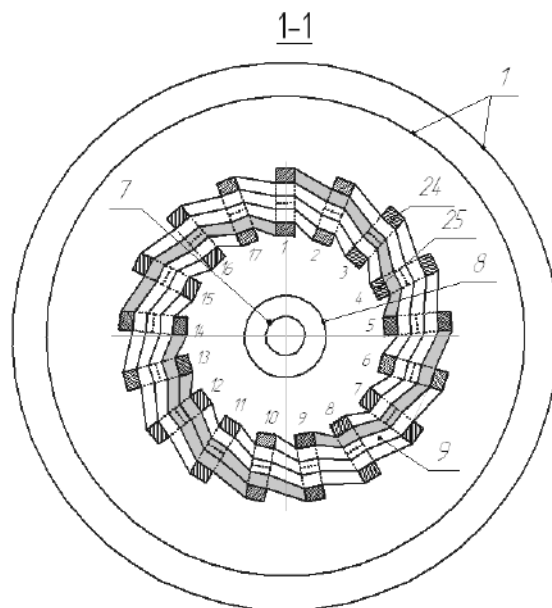


Рис.5. Торцевое сечение предложенной коллекторной машины

Конструкция лобовых проводников 9 аналогична конструкции лобовых проводников 10. Показаны сечения 24 перемычек, соединяющих стержни 16 с лобовыми проводниками 9, и сечения 25 перемычек, соединяющих стержни 17 с лобовыми проводниками 9 обмотки якоря.

Работает предложенная коллекторная машина также как обычная коллекторная машина постоянного тока с неподвижным индуктором.

Таким образом, новая конструкция коллекторной электрической машины (получено решение о выдаче патента) позволяет заменить традиционный коллекторно-щеточный аппарат узлом токосъема с контактными секциями, являющимися частями лобовых проводников обмотки якоря машины. Это обеспечивает уменьшение материалоемкости, массы, объема и повышение КПД машины

IV. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБМОТКЕ

Выполнение лобовых частей обмотки в виде плоских многослойных колец над торцовыми поверхностями сердечника статора и изменение сечений проводников определяет особенности расчета сопротивлений фаз машины, а также вылета лобовых частей обмотки.

При расчете активных сопротивлений учитывают изменения плотности тока в частях проводников обмотки, которые включают участки с уменьшенным сечением. На рис. 6 показаны результаты моделирования с среде ELCUT, проведенного для учета влияния переменной плотности тока в проводниках обмотки.

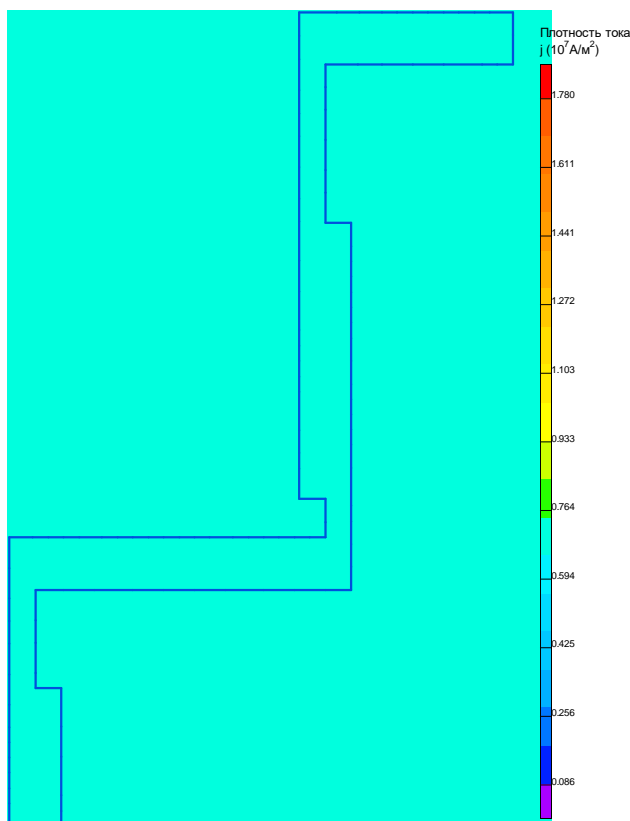


Рис.6. Распределение плотности тока в проводниках обмотки якоря

Результаты исследований показали, что влияние неравномерного распределения плотности тока в проводящих участках с переменным сечением нужно учитывать, проводя моделирование в ELCUT, только для машин с сердечниками малой длины. Для средней длины сердечников предложена упрощенная методика расчета активных сопротивлений фаз обмотки [10]. При расчете активных сопротивлений обмоток на сердечниках габаритов серийных двигателей, учет неравномерного распределения плотности тока в проводниках уточняет величины активных сопротивлений фаз на доли процента. Поэтому он не требуется.

VI. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Анализ расположения проводников лобовых частей прямоугольного сечения над торцами сердечника статора (рис.1) показывает, что в торцевом пространстве статора в каждой фазе обмотки рядом расположены 4 лобовых проводника, причем два из них – над свободной частью паза.

Таким образом, для рассматриваемой обмотки статора можно рассчитать ширину ее лобовых проводников:

$$b_{\text{лп}} = \frac{h_{\text{п}} - 2h_{\text{мс}}}{n} \quad (1)$$

где $b_{\text{лп}}$ – ширина изолированных лобовых проводников;
 $h_{\text{п}}$ – высота паза, занятая активными проводниками;

$h_{\text{мс}}$ – высота мест соединения активных и лобовых проводников (в примере - половина высоты активного проводника);
 n – число изолированных лобовых проводников в слое над свободной частью пазов.

Высота лобовых проводников, при условии равенства сечений активных и лобовых проводников, определяется как:

$$h_{\text{лп}} = \frac{S_{\text{ап}}}{b_{\text{лп}}} \quad (2)$$

где $h_{\text{лп}}$ – высота изолированных лобовых проводников;

$S_{\text{ап}}$ – сечение активных проводников.

На рис. 1 видны три лобовых проводника в группе, расположенные друг над другом. Вылет лобовых частей обмотки статора, которые расположены с зазором Δ относительно сердечника составит:

$$l_{\text{выл}} = 3h_{\text{лп}} + \Delta \quad (3)$$

Расчеты показали, что, для генератора с высотой оси вращения 80мм на базе 4АН80А8У3 напряжением 220 В, за счет снижения вылета лобовых частей обмотки с 29,8мм до 12,7мм, длина активного ядра снижается на 20%, экономия меди составляет 16,2%, а КПД возрастает с 92% до 94%.

V. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАШИНЕ

Для расчета температурных распределений в теле статора и лобовых частях обмотки статора сформулирована трехмерная математическая модель:

$$\frac{\partial T(r, x, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{1}{c\gamma} Q(x, y, z, t), \quad (4)$$

с начальными и граничными условиями:

$$\begin{cases} T(x, y, z, 0) = T_0 = T_C; \\ n \cdot (k \nabla T) = \alpha(T - T_C); \end{cases} \quad (5)$$

где n – нормаль к внешней поверхности расчетной области;

c – удельная теплоемкость стали, проводников и изоляции;

γ – плотность проводников, стали и изоляции;

α – коэффициент конвективного теплообмена,

k – коэффициент теплопроводности стали, проводников, и изоляции,

$Q(x, y, z, t)$ – функция распределения внутренних источников тепла.

Методом конечных элементов рассчитаны распределения температур в статоре для различных зазоров между лобовыми частями обмотки и сердечником статора [14,15]. Картина одного варианта распределения температуры представлена на рис. 7.

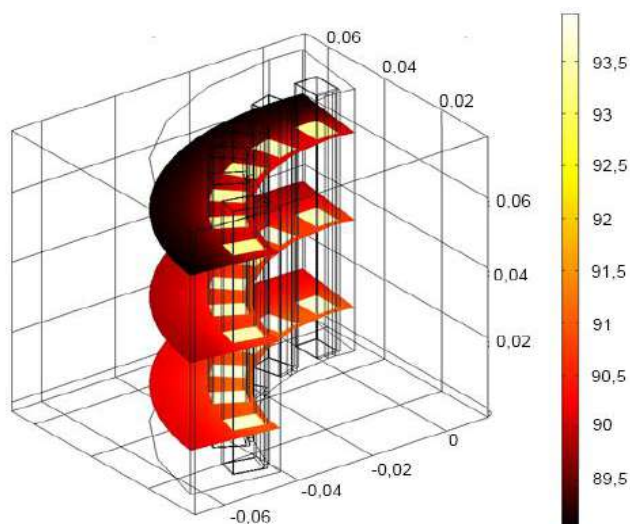


Рис. 7. Распределение температуры в статоре при токе фазы статора 60 А и зазоре между лобовыми частями и торцевой поверхностью сердечника статора 2 мм.

Проводники каждой группы проводников лобовой части статорной обмотки могут быть связаны общей изоляцией. Условия охлаждения этих проводников при малом зазоре хуже, чем тех, что расположены в пазах. Это приводит к повышению температуры лобовых проводников. Диаграмма температур по высоте группы проводников отражает несимметричные условия охлаждения отдельных проводников. Средние значения коэффициентов теплообмена для проводников группы приняты различными на разных поверхностях проводников.

Исследования показали, что для улучшения теплообмена в зоне лобовых частей обмотки статора необходимо связывать проводники групп лобовых частей в плотную общей изоляцией. Для улучшения циркуляции воздуха и повышения коэффициентов теплообмена в торцевых зонах статора можно увеличивать зазоры между группами лобовых проводников и торцами сердечника статора. Далее приведены результаты расчетов тепловых процессов при значительном воздушном зазоре между лобовыми частями и торцами сердечника статора.

Проведены расчеты температурных распределений в активных проводниках статора, соединенных с проводниками лобовых частей. Результаты расчетов представлены в таблице 1, где температуры проводников приняты средними по сечению, как для пазовой части статора, так и для лобовых частей обмотки. Данные таблицы 1 позволяют сделать вывод о том, что происходит выравнивание температуры активных проводников в пазах и проводников лобовых частей обмотки статора, снижается максимальные температуры всех частей двигателя. К недостаткам этого варианта улучшения охлаждения тяговых двигателей можно отнести увеличение вылета лобовых частей обмотки статора. Планируется исследовать другие варианты улучшения охлаждения таких машин, в частности, - жидкостное охлаждение.

Температуры пазовых и лобовых частей

Таблица 1.

№	Коэффициент теплообмена, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$		Температура пазовых проводников, $^\circ C$		Температура лобовых частей, $^\circ C$	
	Торец статора	Лобовые части	min	max	min	max
1	30	29	107	109	108	109
2	30	35	98,8	101	99,1	100
3	30	39	86,8	88,9	86,8	87,7
4	60	43	73,5	75,8	72,8	73,6
5	60	29	90,3	92	89,8	90,3

Выводы

1. Предложенная компактная конструкция обмоток статора машин переменного тока и обмоток якоря коллекторных машин, с проводниками циклически изменяющегося сечения, позволяет уменьшить вылет лобовых частей обмоток, снизить затраты меди на их изготовление, повысить энергетические показатели машин с такими обмотками.

2. Исследование влияния неравномерного распределения плотности тока в проводящих участках с дискретным изменением сечения, проведенное с применением метода конечных элементов и стандартных компьютерных программ, показало незначительное влияние этого явления на величину активных сопротивлений обмоток, а также на степень нагрева изоляции обмоток с переменным сечением.

3. Предложена методика расчета вылета лобовых частей предложенных компактных обмоток. Ее применение выявило существенное снижение габаритов машин с компактными обмотками, при увеличении КПД таких машин.

4. Исследование тепловых процессов в машинах с переменным сечением проводников обмоток, проведенное также с применением метода конечных элементов и стандартных компьютерных программ, показало, что для снижения термического сопротивления проводники групп лобовых частей компактных обмоток нужно располагать вплотную друг к другу, объединяя общей изоляцией. А для улучшения условий теплообмена и выравнивания температуры активных проводников и лобовых частей обмотки статора можно увеличивать зазор между группами проводников лобовых частей обмотки и торцами сердечника статора, что повысит предельную мощность, развиваемую тяговыми двигателями с компактными обмотками в установившихся и динамических режимах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Серый И.М. Особенности автоматического управления тяговым электроприводом / Серый И.М., Носырев М.Б., Иванушкин В.А. // Горный журнал. 2008. № 8. С. 132-135.
- [2] Баранов М.В. Разработка магнитных клиньев для асинхронных двигателей малой и средней мощности / Баранов М.В., Бекетов А.Р., Бердичевский А.С., Денисенко В.И., Лыткин В.В., Недзельский В.Е., Пластун А.Т., Шустов И.И. // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. 2015. Т. 1. С. 179-183.
- [3] Обмотка электрической машины с коротким вылетом лобовых частей. Патент на изобретение RUS 2310965, 02.04.2003. Лыткин В.В.
- [4] T. Ishigami, Y. Tanaka, H. Homma. "Motor stator with thick rectangular wire lap winding for HEVs," IEEE Transactions on Industry Applications Volume 51, Issue 4, July 2015, pp. 2917-2923.
- [5] A. Patzak, F. Bachheibl, A. Baumgardt, G. Dajaku, O. Moroz, and D. Gerling, "ISCAD – Electric High Performance Drive for Individual Mobility at Extra-Low Voltages," SAE Int. J. Alt. Power. 5(1): 148-156, 2016, doi:10.4271/2016-01-1179
- [6] Грачев П.Ю. Энергоэффективная электрическая машина переменного тока со встроенной системой управления и защиты / Грачев П.Ю., Горбачев Е.Е.// Информационное противодействие угрозам терроризма. 2012. № 19. С. 173-177.
- [7] Обмотка электрической машины. Патент на изобретение. RUS 2275729, 15.10.2004. Грачев П.Ю., Сарапулов Ф.Н., Ежова Е.В.
- [8] Энергоэффективная электрическая машина. Патент на изобретение RUS 2526835, 03.08.2012. Грачев П.Ю., Горбачев Е.Е.
- [9]. Энергоэффективная электрическая машина с компактными лобовыми частями обмотки. Патент на изобретение RUS 2602511, 20.11.2016. Грачев П.Ю., Горбачев Е.Е., Стрижакова Е.В.
- [10] Грачев П.Ю. Метод кусочно-плоскопараллельной аппроксимации поля витка с током в приложении к электромеханике / Грачев П.Ю., Табачинский А.С. // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2016. № 12 (94). С. 305-307.
- [11] Грачев П.Ю. Применение обмоток с минимальными лобовыми частями в электротехнологии / Грачев П.Ю., Горшков Р.Г., Макаров Д.В // АПЭЭТ – 2014: Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий: Междунар. науч. конф., Екатеринбург, март 2014 г.: материалы конф.— Екатеринбург, 2014. – С.141-143.
- [12] Грачев П.Ю. Энергоэффективные коллекторные машины с экономичной обмоткой якоря / Грачев П.Ю., Горбачев Е.Е., Карсаков А.Ю. // В сборнике: «Повышение эффективности эксплуатации электромеханических преобразователей энергии»: Материалы IX Междунар. научно-технич. конф. – Омск, 2013. – С. 306-310.
- [13] Инкин А.И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин. Учебное пособие. / Инкин А.И. – Новосибирск: ЮКЭА, 2002. — 464 с.
- [14] Grachev P. Yu., Gorbachev E. E., Tabachinskiy A. S. "Power Converters with Compact Winding SCIGs for HEVs, Micro Hydroelectric Power Stations and Wind Turbines," 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2016. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911521
- [15] P.Yu. Grachev, A.A. Bazarov, A.S. Tabachinskiy "Electrical and thermal processes of HEV induction machines taking into account stator winding form," 2017 IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) (Omsk, Russia), 14 Nov–16 Nov 2017.