

УДК 621.313.84

УЛУЧШЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

А. К. Надкин, А. Б. Захаренко

В настоящее время особенно актуальным является применение электрических машин с улучшенными удельными характеристиками. Проведен анализ конструкции и характеристик магнитной системы двигателя Nissan Leaf, принятого за прототип. Предложены технические решения для создания аналогичного двигателя в габаритных размерах двигателя-прототипа с улучшенными удельными характеристиками. Проведено моделирование предложенной магнитной системы с применением метода конечных элементов. В результате разработана магнитная система с высоким удельным моментом $11 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{кг}$ и возможностью работы в режиме многократного ослабления поля. Благодаря уменьшению толщины ядра статора и увеличению диаметра ротора за счет перехода на схему магнитной системы с $q = 3/8$, числом зубцов 18 и числом полюсов 16 масса магнитной системы снижена на 38%.

Ключевые слова: улучшение показателей, оптимизация, синхронный двигатель, постоянные магниты.

Для приводов летательных, в том числе, орбитальных космических аппаратов особенно актуально использование электрических машин с улучшенными удельными (то есть отнесенными к массе) характеристиками момента и мощности. Наилучшими удельными показателями момента и мощности среди всех типов электрических машин обладают синхронные машины с постоянными магнитами. Целью данной работы является улучшение (увеличение) удельных показателей момента и мощности синхронного двигателя. Задачей статьи является моделирование и расчет предлагаемой магнитной системы.

Для улучшения удельных характеристик необходимо прежде всего оптимизировать магнитную систему электродвигателя. Для этого предлагается рассмотреть в качестве прототипа известный тяговый электродвигатель с высокими удельными показателями, применяемый в электромобилях Nissan Leaf [1 – 5]. Магнитная система двигателя прототипа [3] показана на рис. 1.

Магнитная система прототипа является одним из вариантов синхронного двигателя с постоянными магнитами, расположенными внутри ротора. Число зубцов статора 48, число полюсов 8, число пазов на полюс и фазу 2. Номинальная частота вращения ротора двигателя составляет 2100 об/мин, максимальная – 10 000 об/мин. Номинальный момент двигателя 280 Н·м, мощность 80 кВт. Удельный момент составляет $8,116 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{кг}$, удельная мощность $2,319 \text{ кВт}/\text{кг}$, удельная сила с поверхности ротора $0,07 \text{ Н}/\text{мм}^2$. Подробные параметры двигателя приведены в табл. 1.

Характеристики рабочих режимов двигателя прототипа [3] приведены в табл. 2.

Для уменьшения массы магнитной системы и увеличения удельных показателей момента и мощности предлагаются следующие решения. Переход на схему магнитной системы с $q = 3/8$, числом зубцов 18 и числом полюсов 16 позволит уменьшить

толщину ядра статора и увеличить диаметр ротора, сохранив габаритные размеры. Предлагаемая обмотка относится к зубцовым и отличается более короткими лобовыми частями, по сравнению с распределенной обмоткой, принятой в двигателе прототипе. Ротор предлагается выполнять по схеме с тангенциально расположенными магнитами, что позволит уменьшить потоки рассеяния и улучшить эффективность ослабления поля, благодаря меньшему магнитному сопротивлению по оси d . Переход на большее количество полюсов приведет к увеличению электрической частоты, что связано с ростом электродвижущей силы (ЭДС) и магнитных потерь. Для оценки характеристик двигателя проведены электромагнитные расчеты с использованием метода конечных элементов в программной среде Ansys Maxwell. Схемы магнитной системы предлагаемого двигателя и двигателя прототипа показаны на рис. 2. Масса активной части (без учета лобовых частей обмоток) исходной магнитной системы 34,4 кг, масса предлагаемой магнитной системы 24,9 кг, разница составляет 9,5 кг или 38%.

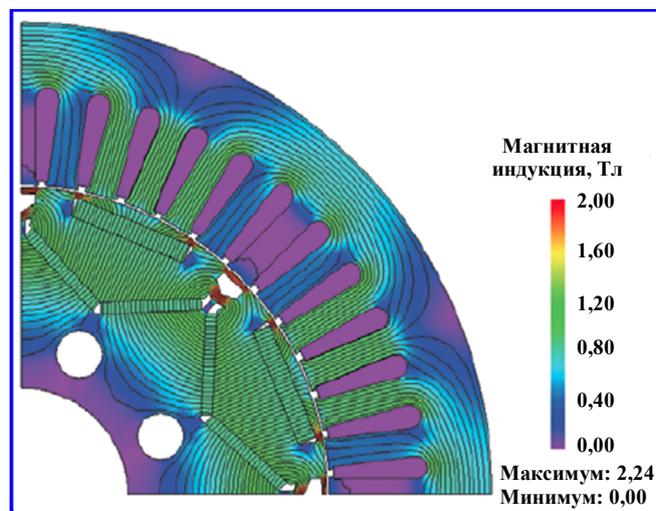


Рис. 1. Магнитная система двигателя Nissan Leaf

Таблица 1

Параметры двигателя прототипа

Параметр	Значение
Внешний диаметр статора, мм	200
Внутренний диаметр статора, мм	131
Внешний диаметр ротора, мм	130
Внутренний диаметр ротора, мм	22,5
Воздушный зазор, мм	0,5
Осевая длина, мм	151
Марка стали статора и ротора (лист 0,35 мм)	35JNE250
Число пазов	48
Число полюсов	8
Число пазов на полюс и фазу	2
Обмоточный коэффициент	0,966
Обмотка	Распределенная, однослойная, без укорочения
Число витков	8
Число элементарных проводников	15
Диаметр провода	0,812
Магниты	N28AH
Размеры большего магнита (толщина, ширина, длина), мм	3,79 × 28,85 × 8,36
Размеры меньшего магнита (толщина, ширина, длина), мм	2,29 × 21,3 × 8,34
Угол скоса, градусов	3,75
Количество магнитов вдоль оси	18
Полюсное перекрытие	0,9765
Масса магнитов, кг	1,895
Масса меди, кг	5,62
Масса стали статора, кг	15,1
Масса стали ротора, кг	11,9
Полная масса магнитной системы	34,5
Мощность выходная, кВт	80
Момент, Н·м	280
Частота вращения, об/мин	2100
Максимальная частота вращения, об/мин	10 000

Таблица 2

Характеристики рабочих режимов двигателя прототипа

Частота вращения, об/мин	2100	3000	4000	5000	6000	7000
ЭДС (действующее значение), В	32,3	46,14	61,53	76,91	92,29	107,68
Момент, Н·м	282,55	254,55	190,89	151,85	127,38	109,1
Ток фазный (амплитудное значение), А	600	535	403	345	300	320
Напряжение фазное (действующее значение), В	66,9	91,72	110,86	122,85	126,05	127,31
Электрические потери, Вт	4433,4	3524,9	2000,07	1465,79	1108,35	1261,06
Потери в стали, Вт	292,3	480,2	673,5	885,9	1102,0	1311,2
Механические потери, Вт	17,15	35,00	62,22	97,22	140,00	190,56
Мощность механическая, Вт	62 136	79 969	79 960	79 508	80 035	79 974
Мощность электрическая, Вт	66 878	84 010	82 697	81 959	82 383	82 737
Коэффициент полезного действия (КПД), %	92,91	95,19	96,69	97,01	97,15	96,66

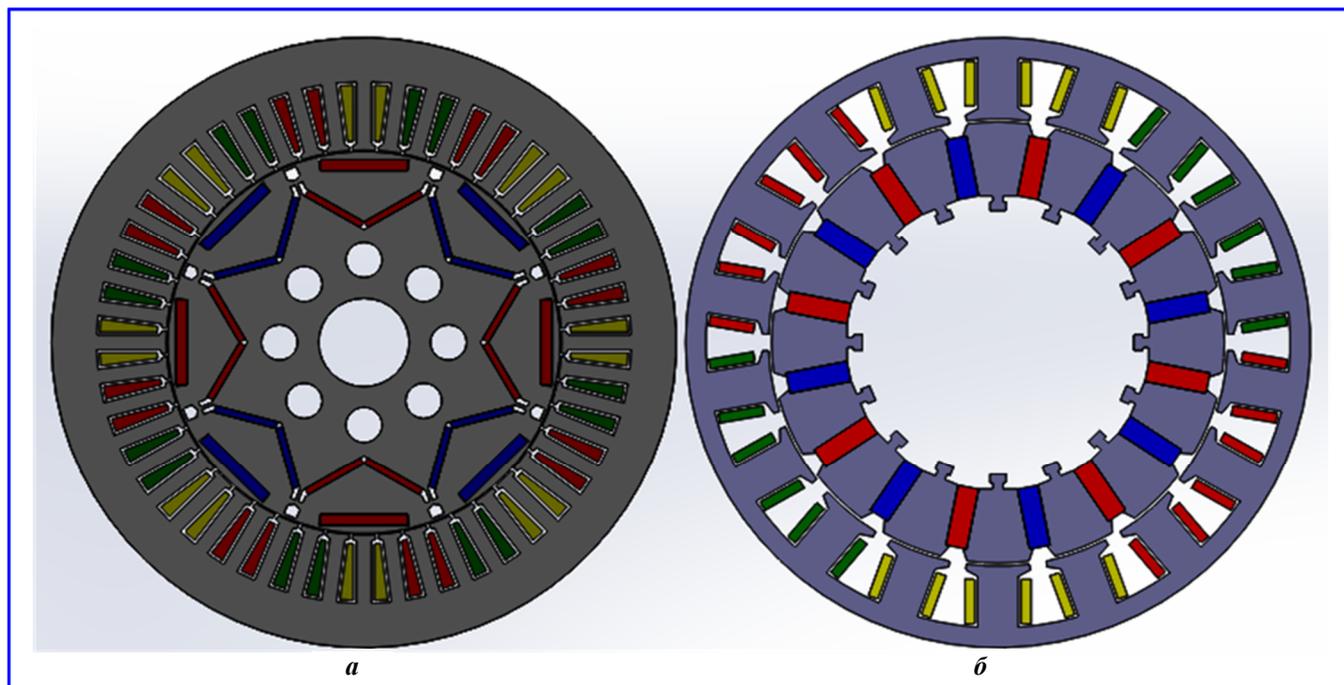


Рис. 2. Схемы магнитной системы: а – исходная; б – предлагаемая

Оптимизация геометрии активной части предлагаемой магнитной системы проводилась с применением генетического алгоритма путем случайного подбора, комбинирования и вариации исходных параметров с использованием механиз-

мов, аналогичных естественному отбору в природе. Подробно суть и примеры применения алгоритма рассмотрены в [6 – 8].

Основные параметры модели и результаты расчета показаны в табл. 3.

Таблица 3

Параметры расчетной модели

Параметр модели	Значение
Число полюсов	$2p = 16$
Число зубцов	$Z = 18$
Число витков на зубце	$w = 3$
Число параллельных ветвей обмотки	$a = 2$
Частота вращения, об/мин	$n = 2000$
Электрическая частота, Гц	$f = 266,667$
Момент, Н·м	$M = 283$
Электрические потери, Вт	$P_3 = 2991$
Потери в стали, Вт	$P_{ст} = 550$
Действующее значение фазного тока (синус), А	$I = 686,365$
Действующее значение фазной ЭДС холостого хода, В	$E_{xx} = 34,619$
Действующее значение фазной ЭДС при нагрузке, В	$E_n = 51,439$
Активное сопротивление фазы, Ом	$R = 2,116 \cdot 10^{-3}$
Действующее значение фазного напряжения, В	$U = 53$
Механическая мощность, Вт	$P_2 = 59271$
КПД	$\eta = 0,944$
Электрическая мощность, Вт	$P_1 = 62812$
Плотность тока в пазу, А/мм ²	$J = 23$
Удельная сила с поверхности ротора, Н/мм ²	$F = 0,053$
Удельный момент, Н·м/кг	$M_{уд} = 11,365$

На рис. 3 – 12 показаны некоторые результаты моделирования.

Для моделирования режима ослабления поля вектор тока поворачивался от оси q к оси d с шагом 10 электрических градусов. В результате построены графики момента и ЭДС в зависимости от угла вектора тока (рис. 3) и определена механическая характеристика двигателя (рис. 4).

Амплитудное значение тока составило $I = 970,7$ А, электрическая частота $f = 266,7$ Гц, частота вращения $n = 2000$ об/мин. Механическая характеристика (рис. 4) является жесткой в диапазоне от 0 до 2000 об/мин. При

частотах вращения выше 2000 об/мин предлагается рассмотреть режим ослабления поля. При этом по мере увеличения угла отклонения тока от оси q к оси d происходит изменение момента, характер которого отражен на рассматриваемом рисунке. При значении угла 25 градусов момент составляет 280 Н·м, амплитуда линейной ЭДС – 97 В, напряжения – ~107 В. При значении угла 78 градусов происходит пятикратное ослабление поля, момент составит 70 Н·м. При частоте 1000 Гц частота вращения составит 7500 об/мин, ослабление поля 3,75, угол тока 75 град., момент 80 Н·м.

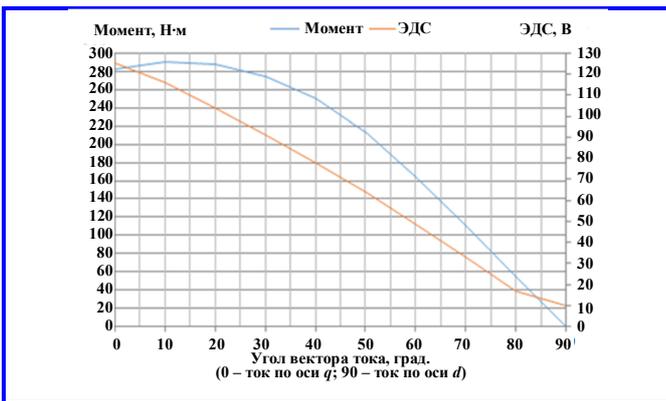


Рис. 3. График зависимости вращающего момента и амплитуды линейной электродвижущей силы от угла вектора тока

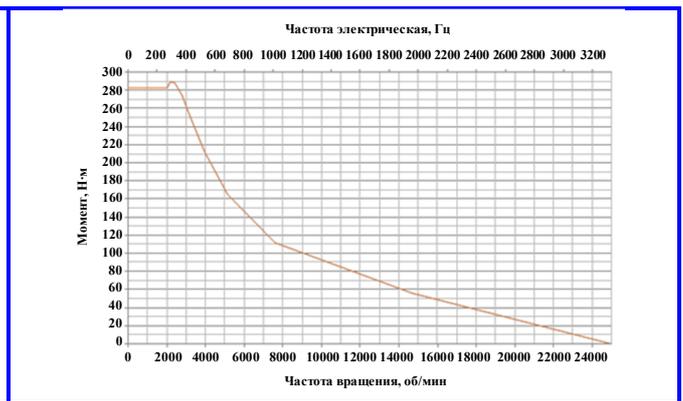


Рис. 4. Механическая характеристика предлагаемого двигателя

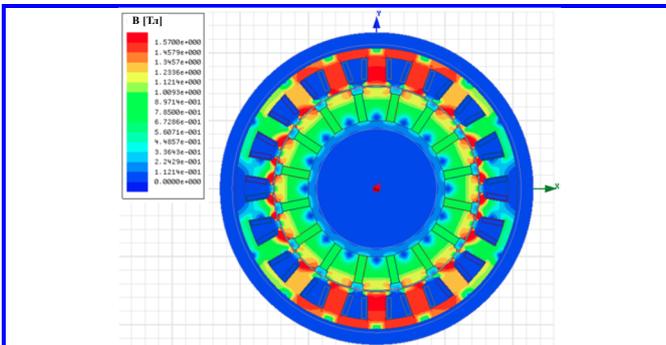


Рис. 5. Магнитное поле в режиме холостого хода

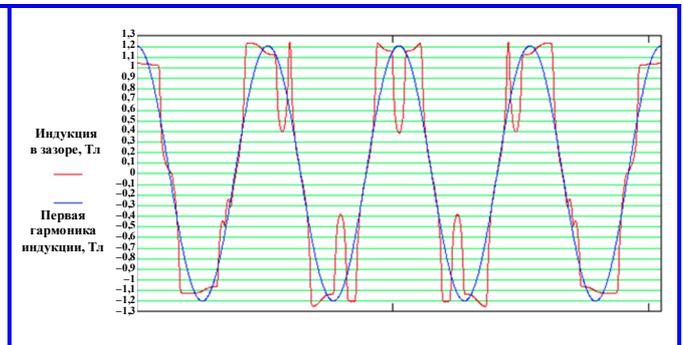


Рис. 6. График магнитной индукции в зазоре в режиме холостого хода (на половине окружности)

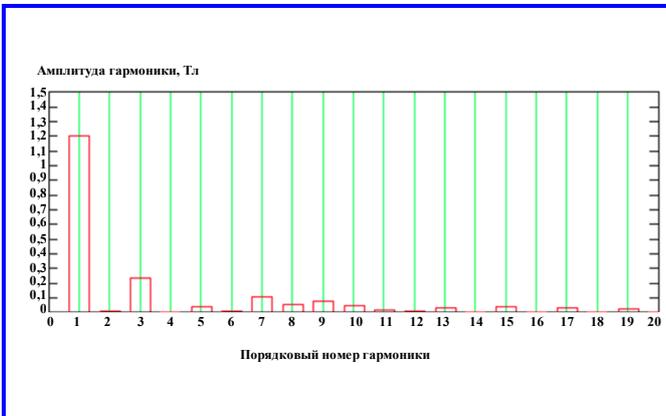


Рис. 7. Гармонический состав магнитной индукции в зазоре

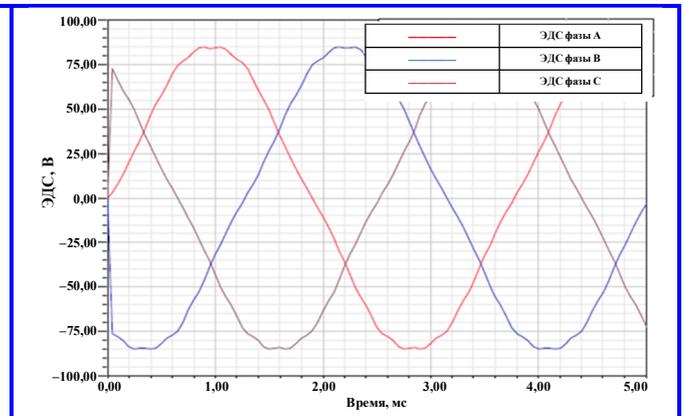


Рис. 8. Электродвижущая сила холостого хода (линейное значение)

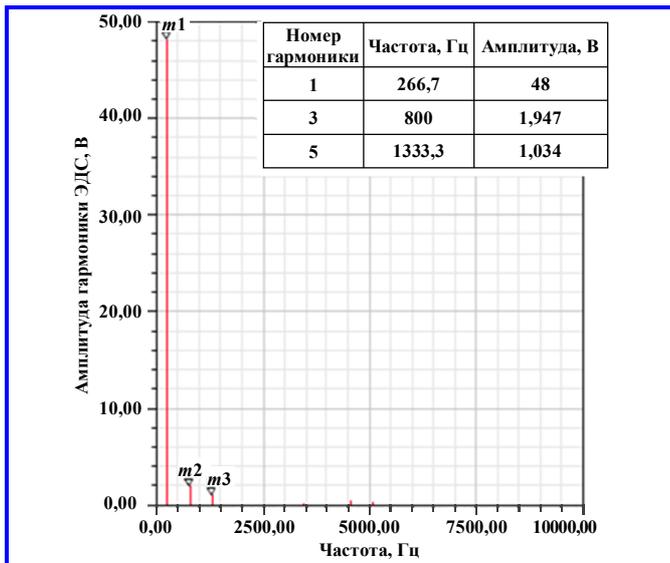


Рис. 9. Гармонический состав электродвижущей силы холостого хода

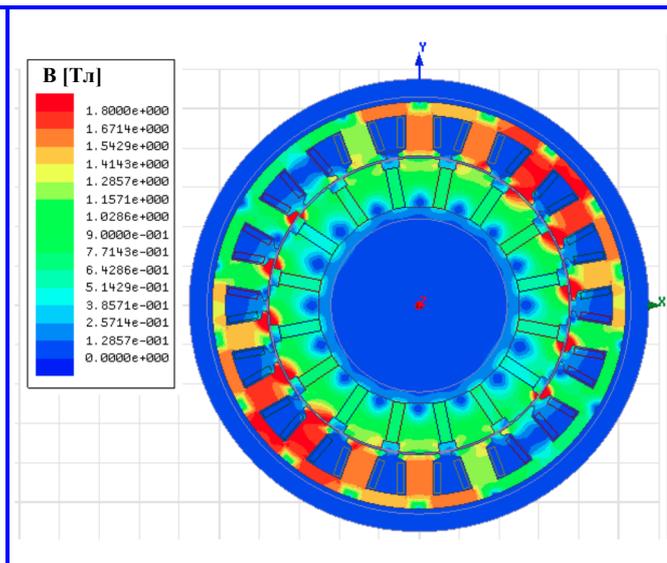


Рис. 10. Магнитное поле в режиме нагрузки

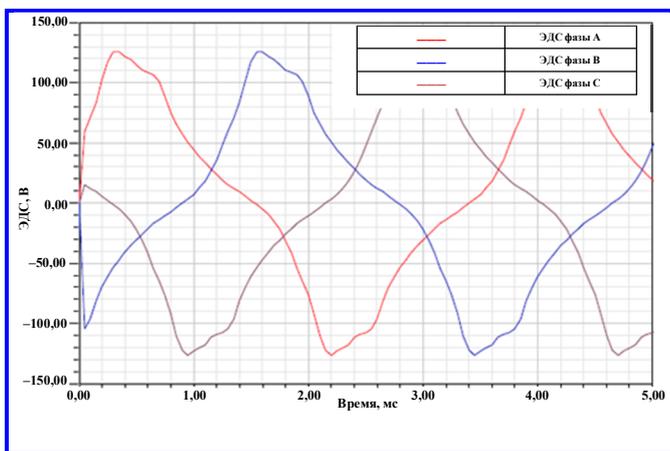


Рис. 11. Электродвижущая сила в режиме нагрузки (линейное значение)

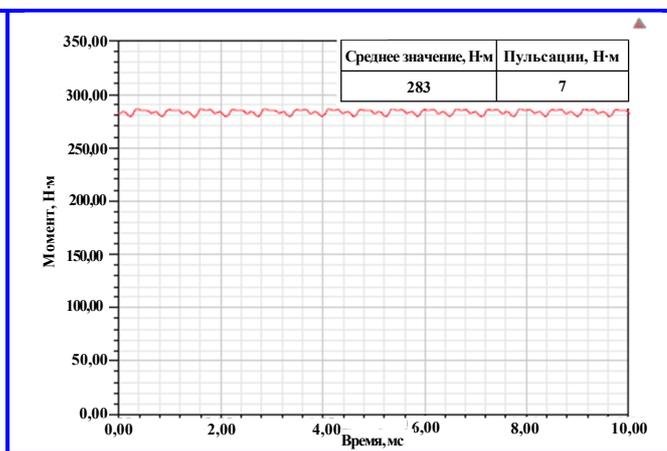


Рис. 12. Вращающий момент при амплитуде тока 970,7 А (угол отклонения от оси q 0 электронных градусов)

Согласно расчету поля (рис. 5), индукция в ножке зубца и в ярме достигает в режиме холостого хода 1,57 Тл. При большей величине индукции происходит ухудшение формы ЭДС холостого хода в связи с ростом амплитуд 3-й, 5-й и 7-й гармоник. Для адекватного анализа насыщения магнитной системы необходимо рассмотреть режим нагрузки.

График индукции в зазоре показан на рис. 6. Проведенный гармонический анализ индукции в зазоре (рис. 7) показывает, что амплитуда основной гармоники индукции составляет 1,2 Тл, амплитуда третьей гармоники составляет 4% от первой, амплитуда пятой – 2%, что достаточно хорошо.

Форма ЭДС холостого хода (рис. 8) достаточно близка к синусоидальной. Проведенный гармонический анализ (рис. 9) отражает вклад высших гармоник в форму ЭДС холостого хода. В соответствии с рис. 9 амплитуда третьей гармоники не

превышает 4% от основной, амплитуда пятой – не превышает 2%, остальными высшими гармониками можно пренебречь в виду малых значений их амплитуд. Хорошие формы индукции в зазоре и ЭДС холостого хода свидетельствуют о том, что геометрия активной части близка к оптимальной.

Магнитная индукция в ножке зубца и в ярме в режиме нагрузки достигает 1,8 Тл (рис. 10), что вполне приемлемо для применяемой стали. Дальнейшее увеличение индукции привело бы к значительным магнитным потерям. Рис. 11 отражает изменение формы ЭДС в режиме нагрузки вследствие реакции якоря.

График момента приведен на рис. 12. Среднее значение момента составляет 283 Н·м, величина пульсаций не превышает 3% от среднего значения. Малая величина пульсаций момента также свидетельствует о том, что геометрия активной части близка к оптимальной.

Выводы

1. Проведенный анализ конструкции магнитной системы двигателя Nissan Leaf позволил выявить способы снижения массы при сохранении момента, а именно увеличение числа полюсов, изменение схемы обмотки, изменение способа расположения магнитов.

2. В соответствии с предложенными техническими решениями создана расчетная модель и проведены электромагнитные расчеты, результаты которых подтвердили возможность создания электродвигателя-аналога с улучшенными удельными показателями момента и мощности.

3. Проведенный гармонический анализ показывает, что вклад высших гармоник в кривые индукции в зазоре и ЭДС холостого хода достаточно небольшой. Пульсации момента незначительные. Следовательно, геометрия зубцовой зоны предлагаемой магнитной системы близка к оптимальной.

4. В результате разработана магнитная система с удельным моментом 11 Н·м/кг и возможностью работы в режиме многократного ослабления поля. Масса магнитной системы снижена на 38%.

Литература

1. Design of a 5-Phase IPM Machine for Electric Vehicles / O. Beik, R. Yang, A. Emadi // 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – Long Beach, CA, 2018. – P. 168 – 172. – DOI: 10.1109/ITEC.2018.8450210.
2. Simplified electric vehicle powertrain model for range and

energy consumption based on EPA coast-down parameters and test validation by Argonne National Lab data on the Nissan Leaf / J. G. Hayes, K. Davis // 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – Dearborn, MI, 2014. – P. 1 – 6. – DOI: 10.1109/ITEC.2014.6861831.

3. Development of High Response Motor and Inverter System for the Nissan LEAF Electric Vehicle / Y. Sato, S. Ishikawa, T. Okubo [et al.] // SAE Technical Paper 2011-01-0350. – 2011. – 8 p. – DOI: 10.4271/2011-01-0350.

4. Comparative study between interior and surface permanent magnet traction machine designs / Rong Yang, N. Schofield, A. Emadi // 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – Dearborn, MI, 2016. – P. 1 – 6. – DOI: 10.1109/ITEC.2016.7520249.

5. Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications / Y. Yang, S. M. Castano, R. Yang [et al.] // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2017. – Vol. 3. – № 1. – P. 86 – 97. – DOI: 10.1109/TTE.2016.2614972.

6. Optimization of a new type of hysteresis motor using genetic algorithm / M. H. Sadeghi, A. Darabi // 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering. – Prague, 2010. – P. 479 – 482. – DOI: 10.1109/EEEIC.2010.5490036.

7. Design and Optimization with Genetic Algorithm of Double Rotor Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor (TORUS Type) for Electrical Vehicles / R. Akinci, M. Polat // The 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA). – Elazig, 2019. – 5 p.

8. Optimal Design of an SPM Motor Using Genetic Algorithms and Taguchi Method / Chang-Chou Hwang, Li-Yang Lyu, Cheng-Tsung Liu [et al.] // IEEE transactions on magnetics. – 2008. – Vol. 44. – № 11. – P. 4325 – 4328.

Поступила в редакцию 04.02.2021

Александр Каренович Надкин, кандидат технических наук, научный сотрудник, т. (495)366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.

Андрей Борисович Захаренко, доктор технических наук, начальник отдела, доцент, т. (495)366-26-44, e-mail: otde118@mcc.vniiem.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

IMPROVEMENT OF SPECIFIC INDICES OF MEDIUM POWER SYNCHRONOUS PERMANENT MAGNET MOTORS

A. K. Nadkin, A. B. Zakharenko

Presently the use of electrical machines with improved specific characteristics is of particular importance. The article analyses the structure and characteristics of the magnetic system of Nissan Leaf motor taken as a prototype. The technical solutions for development of a similar motor with improved specific characteristics having the same dimensions as the prototype motor are considered. Modeling of the suggested magnetic system with application of the finite element method is implemented. As a result, a magnetic system with high specific torque of 11 N·m/kg and ability to operate in multiple field weakening mode has been developed. Due to reduction of the frame yoke thickness and the increase of the rotor diameter resulting from transition to a magnetic system scheme with $q = 3/8$, 18 slots and 16 poles, the mass of the magnetic system has been reduced by 38%.

Key words: performance improvement, optimization, synchronous motor, permanent magnets.

References

1. Design of a 5-Phase IPM Machine for Electric Vehicles / O. Beik, R. Yang, A. Emadi // 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – Long Beach, CA, 2018. – P. 168 – 172. – DOI : 10.1109/ITEC.2018.8450210.
2. Simplified electric vehicle powertrain model for range and energy consumption based on EPA coast-down parameters and test validation by Argonne National Lab data on the Nissan Leaf / J. G. Hayes, K. Davis // 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – Dearborn, MI, 2014. – P. 1 – 6. – DOI : 10.1109/ITEC.2014.6861831.
3. Development of High Response Motor and Inverter System for the Nissan LEAF Electric Vehicle / Y. Sato, S. Ishikawa, T. Okubo [et al.] // SAE Technical Paper 2011-01-0350. – 2011. – 8 p. – DOI : 10.4271/2011-01-0350.
4. Comparative study between interior and surface permanent magnet traction machine designs / R. Yang, N. Schofield, A. Emadi // 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – Dearborn, MI, 2016. – P. 1 – 6. – DOI : 10.1109/ITEC.2016.7520249.
5. Design and Comparison of Interior Permanent Magnet Motor Topologies for Traction Applications / Y. Yang, S. M. Castano, R. Yang [et al.] // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2017. – Vol. 3. – № 1. – P. 86 – 97. – DOI : 10.1109/TTE.2016.2614972.
6. Optimization of a new type of hysteresis motor using genetic algorithm / M. H. Sadeghi, A. Darabi // 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering. – Prague, 2010. – P. 479 – 482. – DOI : 10.1109/EEEIC.2010.5490036.
7. Design and Optimization with Genetic Algorithm of Double Rotor Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor (TORUS Type) for Electrical Vehicles / R. Akinci, M. Polat // The 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA). – Elazig, 2019. – 5 p.
8. Optimal Design of an SPM Motor Using Genetic Algorithms and Taguchi Method / Chang-Chou Hwang, Li-Yang Lyu, Cheng-Tsung Liu [et al.] // IEEE transactions on magnetics. – 2008. – Vol. 44. – № 11. – P. 4325 – 4328.

*Aleksandr Karenovich Nadkin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Researcher,
tel.: (495)366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.*

*Andrei Borisovich Zakharenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of Department, Associate Professor,
tel.: (495)366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).*