

Тихонов Андрей Ильич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой физики, e-mail: aitispu@mail.ru

Tikhonov Andrei Ilyich,
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Head of the Physics Department, e-mail: aitispu@mail.ru

Каржевин Андрей Александрович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина», аспирант, e-mail: drusja95@gmail.com

Karzhevin Andrei Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, e-mail: drusja95@gmail.com

Подобный Александр Викторович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина», аспирант, e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

Podobny Aleksandr Viktorovich,
Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

Дрязгов Дмитрий Евгеньевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина», магистрант, e-mail: crus943@gmail.com

Dryazgov Dmitry Yevgenyevich,
Ivanovo State Power Engineering University, Master course student, e-mail: crus943@gmail.com

УДК 621.313

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАЩЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ПРИВОДА ЛЕБЕДКИ

М.В. САХАРОВ¹, В.Н. КАРАУЛОВ²

¹ ООО «Эльмаш (УЭТМ)», Екатеринбург, Российская Федерация

² ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: sakharov_mv@uetm.ru¹; karaulov@em.ispu.ru²

Авторское резюме

Состояние вопроса. При проектировании синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки необходимо учитывать особенности этой машины. Двигатель имеет обращенную конструкцию с ограниченными размерами, питается от преобразователя частоты, запускается при номинальной частоте питания и номинальной нагрузке без использования демпферной обмотки и частотного пуска, обеспечивает требуемый диапазон скоростей намотки каната. Специализированная инженерная методика проектирования синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки отсутствует. Требуется внести изменения и дополнения в существующие методики проектирования синхронных машин при решении задачи проектирования синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки.

Материалы и методы. При проектировании и выполнении поверочного электромагнитного расчета синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки использована методика проектирования машин с постоянными магнитами В.А. Балагурова и методика проектирования общепромышленных синхронных машин с электромагнитным возбуждением. Методики реализованы в среде Mathcad. Для моделирования электромеханических процессов и теплового состояния синхронного двигателя с постоянными магнитами использованы их полевые модели.

Результаты. Разработана методика проектирования обращенного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки, отличающаяся от известных и обеспечивающая за счет этого учет особенности конструкции синхронного двигателя с постоянными магнитами при расчете размеров машины, магнитов, сердечника статора, при выборе электромагнитных нагрузок, проектировании обмотки статора, выборе системы охлаждения и марки стали сердечника статора. Специфические требования технического задания учтены при расчете числа полюсов и частоты питающего напряжения. Выполнен проект обращенного синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки. Представлены результаты проектирования и поверочных расчетов.

Выводы. Достоверность результатов проверена с помощью полевого моделирования электромеханических процессов и теплового состояния синхронного двигателя с постоянными магнитами. Решена проблема отсутствия специализированной инженерной методики проектирования синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки. Методика может быть использована инженерами-электромеханиками при решении задачи проектирования синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки, позволяет получить проект синхронного двигателя с постоянными магнитами, соответствующий требованиям технического задания и особенностям эксплуатации.

Ключевые слова: электропривод лебедочных механизмов, синхронный двигатель с постоянными магнитами, обращенная конструкция

METHOD OF WINCH DRIVE PERMANENT MAGNET INVERTED MOTOR DESIGN

M.V. SAKHAROV¹, V.N. KARAULOV²

¹ JSC «Elmash (UETM)», Yekaterinburg, Russian Federation

² Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: sakharov_mv@uetm.ru¹; karaulov@em.ispu.ru²

Abstract

Background. Designing a permanent magnet synchronous motor (PMSM) of a winch drive needs to take into account the features of this machine. The engine has an inverted design with limited dimensions, is powered by a frequency converter, runs at the nominal power frequency and nominal load without using the damping winding and frequency start, and provides the required range of rope winding speeds. There is no specialized engineering design methodology for the winch drive PMSM. It is required to make changes and additions to the existing methods of designing synchronous machines when solving the problem of designing a winch drive PMSM.

Materials and methods. Design and validation calculations were performed in the Mathcad environment based on the technique of designing machines with V.A. Balagurov's permanent magnets and methods of designing general-purpose industrial synchronous machines with electromagnetic excitation. Field models of PMSM were used for modelling electromechanical processes and thermal status.

Results. The developed technique of designing the winch drive permanent magnet inverted motor is different from the known methods and due to this allows accounting for the design features of PMSM in the calculation of the size of the machine, the magnets, the stator core, the choice of electromagnetic loads, the design of the stator winding, the choice of the cooling system and the steel grade of the stator core. The specific requirements of the technical specification are taken into account when calculating the number of poles and the frequency of the supply voltage. A design project of the inverted PMSM of the winch drive has been developed. And the paper presents the design and verification calculations results.

Conclusions. The reliability of the results was checked by field modeling of electromechanical processes and the thermal state of the PMSM. The study has solved the problem of no specialized engineering design techniques of the winch drive PMSM. The technique can be used by electromechanical engineers in solving the problem of designing winch drive PMSM as it allows making a design project of the PMSM corresponding to the requirements of the technical specifications and operation feature.

Key words: electric winch drive, synchronous motor with permanent magnets, inverted design

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.2.051-058

Введение. Проблема энергоэффективности электропривода различных установок в промышленности, в частности нефтегазовой, является очень актуальной в настоящее время [1].

Одним из важнейших элементов электропривода буровых нефтегазовых установок является лебедка. Современные требования к электроприводу лебедок заключаются не только в высоких требованиях к энер-

гетическим показателям, но и в необходимости плавного автоматического регулирования скорости намотки каната, возможности рекуперации тока и предельно возможной компактности лебедочных механизмов.

Возможность автоматического регулирования скорости и рекуперации тока осуществима за счет применения частотно-управляемого привода с энкодером [2]. Наилучшим вариантом конструкции машины,

позволяющим максимально использовать предоставленный заказчиком габарит, является синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) обращенной конструкции [3, 4]. Применение высокоэнергетических магнитов позволяет сократить объем активной зоны машины, а обращенная конструкция позволяет сочетать функции приводного механизма и барабана лебедки в одном устройстве (рис. 1).

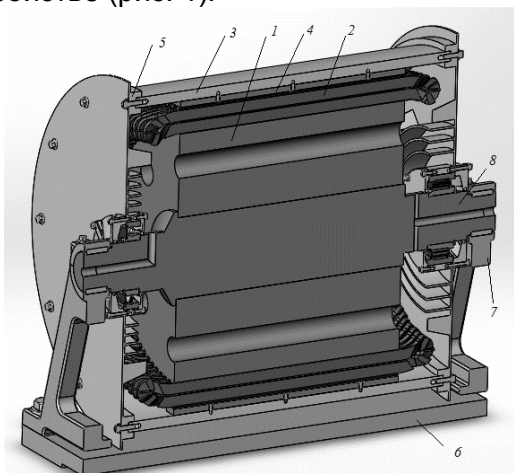


Рис. 1. Разрез трехмерной модели обращенного СДПМ: 1 – статор; 2 – обмотка статора; 3 – ротор; 4 – магниты; 5 – подшипниковые щиты; 6 – плита станины; 7 – кронштейны станины; 8 – подвижный вал

Инженерное проектирование, являющееся одним из старейших методов, актуально и по сей день. Преимущество инженерных методик проектирования состоит в том, что они позволяют по заранее подготовленному алгоритму быстро спроектировать требуемый объект с приемлемой точностью (до 5–10 %).

При проектировании синхронного двигателя с постоянными магнитами привода лебедки необходимо учитывать его особенности. Эта машина имеет обращенную конструкцию с ограниченными размерами; питается от преобразователя частоты (ПЧ); запускается при номинальной частоте питания и номинальной нагрузке без использования демпферной обмотки и частотного пуска; обеспечивает требуемый диапазон скоростей намотки каната. Специализированная инженерная методика проектирования СДПМ привода лебедки отсутствует. Требуется внести изменения и дополнения в существующие методики проектирования синхронных машин при решении задачи проектирования СДПМ привода лебедки.

Методы исследования. Существует большое количество работ в области инженерного проектирования и поверочных электромагнитных расчетов синхронных машин как с постоянными магнитами, так и с электромагнитным возбуждением [5, 6, 3, 7, 8–11]. В качестве основы для проектирования СДПМ электропривода лебедочных механизмов были выбраны две методики: методика проектирования машин с постоянными магнитами В.А. Балагурова [5, 6] и методика проектирования общепромышленных синхронных машин с электромагнитным возбуждением [7]. Эти методики не предназначены для проектирования обращенных электрических машин и не учитывают особенность питания СДПМ в электроприводе лебедочных механизмов.

Ниже описаны изменения, внесенные в методику В.А. Балагурова в связи с проектированием СДПМ электропривода лебедочных механизмов. Методика разработана для компактных специальных синхронных машин с постоянными магнитами и магнитной системой «звездочка». Общий подход к выбору главных размеров СДПМ, КПД и коэффициента мощности осуществляется согласно рекомендациям методики.

Особенность технического задания (ТЗ) на проектирование СДПМ для электропривода лебедочных механизмов заключается в том, что указана не частота вращения двигателя, а требуемый диапазон скорости намотки каната. Соответственно, изменен алгоритм выбора числа пар полюсов СДПМ. Адаптированный алгоритм опирается на известные [2] величины минимальной и максимальной частот ПЧ и требования к диапазону скоростей: максимальной, минимальной и номинальной [4]. Используются следующие формулы:

$$n = \frac{60 \cdot V_{\text{каната}}}{\pi D_{\text{рвн}} \cdot 10^{-3}}; \quad k_{3\varphi} = \frac{V_{\text{кн}}}{V_{\text{кмин}}}; \quad (1)$$

$$f_{\text{н}} = f_{\text{мин}} k_{3\varphi}; \quad \rho = \frac{f_{\text{н}} \cdot 60}{n_{\text{н}}}.$$

Обмотка статора в СДПМ для электропривода лебедочных механизмов имеет большое число полюсов и малое число катушек на полюс и фазу. Обмотку следует выполнять с дробным числом пазов на полюс и фазу q , что позволяет уменьшить пульсации электромагнитного момента.

В качестве хладагента в представленной конструкции СДПМ используется транс-

форматорное масло. Поскольку номинальная частота вращения невелика, то можно не опасаться действия большого тормозного момента со стороны вязкого хладагента и, соответственно, чрезмерного его перегрева. Для повышения надежности бандажирования лобовых частей обмотки статора, находящихся в зоне циркуляции вязкого хладагента, следует выполнять фазы обмотки одной параллельной ветвью с жесткими катушками из прямоугольного провода.

При работе СДПМ возможны перенапряжения, обусловленные коммутацией в ПЧ и волновыми процессами в обмотке. При проектировании обмотки статора следует увеличить величину изоляции (достаточно вдвое [12]) по сравнению с рекомендованной для номинального напряжения.

Для изготовления магнитопровода статора целесообразно использовать вместо стали 2214 сталь 2013. Характеристика намагничивания последней лучше и сталь дешевле. Потери в стали при этом возрастают незначительно, так как номинальная частота перемагничивания в СДПМ для электропривода лебедочных механизмов невелика (меньше 10 Гц).

Величина зазора в СДПМ слабо влияет на магнитное сопротивление на пути рабочего потока. Поэтому целесообразно зазор в машине выбирать минимальным (технологически возможным). Однако следует учитывать, что при наличии открытых пазов статора малый зазор усиливает провалы в кривой поля магнита и пульсации электромагнитного момента.

В соответствии с обращенной конструкцией СДПМ, используются следующие формулы для расчетов размеров сердечника статора:

$$D_B = k_1 \sqrt[3]{\frac{P_H}{n_H}}; \quad h_a = \frac{(D_1 \cdot 10^{-3} - D_B - 2 \cdot h_{\Gamma 1}) \cdot 10^{-3}}{2}; \quad (2)$$

$$b_{Z1cp} = \left[\left(\frac{D_1 - h_{\Gamma 1}}{Z_1} \right) \cdot 10^{-3} - b_{\Gamma 1} \cdot 10^{-3} \right].$$

Представленные выше изменения методики В.А. Балагурова позволяют получить проект СДПМ для электропривода лебедочных механизмов, соответствующий требованиям технического задания (ТЗ) и особенностям эксплуатации.

Следует отметить, что методика В.А. Балагурова опирается на использова-

ние следующих формул для определения необходимого объема и размера магнитов:

$$V_M = \frac{0,9 \cdot P_{max} \alpha_1 \sigma_0 k k_{ad} \cdot 10^9}{4 \cdot k_{\Phi} \cdot 5 \cdot B_{M0} H_{MK} \sqrt{1 - \frac{1}{k^2}}}; \quad (3)$$

$$D_M = \sqrt[3]{\frac{25 \cdot V_M k_{3АП}}{\pi \lambda_M k_{3М}}}.$$

Специальные коэффициенты α_1 ; k ; λ_M ; $k_{3М}$; $k_{3АП}$, входящие в формулы (3), не используются в общей теории проектирования электрических машин. Выбор точной величины этих специальных коэффициентов при проектировании СДПМ для электропривода лебедочных механизмов является проблематичным. Кроме того, отметим, что методика В.А. Балагурова не позволяет в ходе проектирования СДПМ использовать габаритные размеры машины, указанные заказчиком.

Применяя методику проектирования общепромышленных синхронных машин с электромагнитным возбуждением [7] к проектированию СДПМ электропривода лебедочных механизмов, можно избежать указанных выше недостатков. Ниже описаны изменения, внесенные в методику в связи с проектированием СДПМ электропривода лебедочных механизмов.

Внедрен алгоритм выбора числа пар полюсов, описанный выше. Рекомендации к выбору электромагнитных нагрузок A и B_{δ} , приведенные в [7], заменены на рекомендации для компактных авиационных синхронных машин с постоянными магнитами [6].

Величину диаметра расточки статора обращенной конструкции СДПМ предлагается вычислять с помощью коэффициента k_{Γ} , определяющего отношение диаметра расточки статора к ограничивающему габариту:

$$k_{\Gamma} = \frac{D_1}{\Gamma}. \quad (4)$$

Согласно методике, определяется расчетная длина машины [7]. Внешний диаметр машины (диаметр барабана) определяется по формуле

$$D_{RBH} = D_1 \cdot k_D. \quad (5)$$

Величина коэффициента k_D выбирается согласно методике [7].

Сердечник статора следует выполнять единым пакетом без использования радиальных каналов. Поскольку трансформаторное масло является вязким, то радиальные каналы обладают высоким гидродинамиче-

ским сопротивлением. Целесообразно вместо радиальных каналов использовать аксиальные каналы большого диаметра в недогруженном ярме статора (рис. 1).

При выборе величины зубцового деления следует сначала назначить дробное число пазов на полюс и фазу q , а уже затем на его основе рассчитать зубцовое деление. При этом размеры паза должны быть достаточными для размещения обмотки статора. Размеры зубца и ярма должны обеспечить рекомендуемые величины магнитной индукции в этих участках.

Высота магнита должна обеспечить нормальное возбуждение СДПМ в номинальном режиме работы (коэффициент мощности равен единице). Высота магнита назначается исходя из известных размеров внешнего диаметра ротора D_{RVH} и диаметра расточки статора D_1 . По результатам поверочного электромагнитного расчета определяется коэффициент мощности в номинальном режиме работы СДПМ. При необходимости корректируется высота магнита.

Представленные выше изменения методики [7] позволяют получить проект СДПМ для электропривода лебедочных механизмов, соответствующий требованиям ТЗ и особенностям эксплуатации.

Результаты. Адаптированные методики [5, 7] использованы при проектировании обращенного СДПМ привода лебедки [12] в соответствии с требованиями ТЗ (табл. 1).

Поверочный электромагнитный расчет СДПМ, выполненный по методикам [5, 7], показал, что спроектированная машина удовлетворяет требованиям ТЗ как в области энергетических показателей, так и с точки зрения диапазона скоростей. Достоверность результатов проверена в результате полевого моделирования электромеханических процессов и теплового состояния СДПМ. На рис. 2 представлены результаты моделирования процесса пуска и выхода в установившийся номинальный режим работы обращенного СДПМ методом конечных элементов в среде Ansys Maxwell. При номинальной частоте питающего напряжения $f_H = 6$ Гц и номинальной постоянной нагрузке мощностью $P_H = 60$ кВт машина запускается, втягивается в синхронизм и работает с номинальными показателями, несмотря на отсутствие пусковой обмотки.

Таблица 1. Номинальные параметры двигателя и энергетические показатели

Показатель	Размерность	Значение полученное	Требование ТЗ
Номинальная мощность	Вт	60020	60000
Номинальная потребляемая мощность	Вт	71050	–
Номинальный ток статора	А	62,329	–
Номинальный угол нагрузки	град.	24,758	–
Коэффициент мощности	–	1	1
КПД	о.е.	0,845	0,845
Перегрузочная способность	о.е.	1,721	1,7
Предельный угол нагрузки	град.	68,3	–
Минимальная скорость намотки каната	м/с	0,215	$\leq 0,2$
Номинальная скорость намотки каната	м/с	1,288	1,3
Максимальная скорость намотки каната	м/с	10,73	$\geq 2,5$

Машина имеет хорошие пусковые свойства. Электромагнитный пусковой момент, складывающийся из синхронизирующего и генераторного моментов, имеет кратность 1,3–1,4. Кратность действующего значения пускового тока равна 1,2–1,3. Малая величина пускового тока обусловлена тем, что в конструкции СДПМ отсутствует пусковая обмотка. Время разгона машины до номинальной скорости равно одному периоду питающего напряжения.

Следует отметить, что в номинальном режиме работы СДПМ привода лебедки токи статора несинусоидальны и наблюдаются пульсации электромагнитного момента.

Несинусоидальность токов статора является следствием несинусоидальной формы поля магнита в зазоре. Магниты выполнены без полюсных наконечников, зазор равномерный, форма поля магнита в зазоре является прямоугольной. Влиянием несинусоидальных токов на сеть можно пренебречь, так как СДПМ применяется только в комплексе с ПЧ, который содержит большое число фильтров, сглаживающих обратное влияние несинусоидальных токов на источник питания.

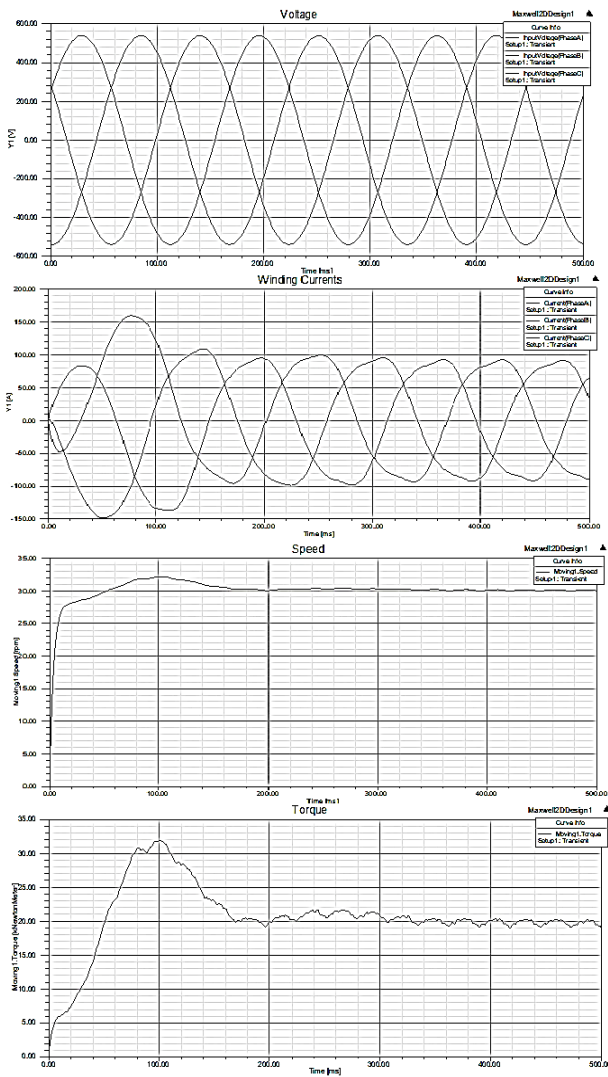


Рис. 2. Результаты полевого моделирования пуска обращенного СДПМ в Ansys Maxwell (число пазов на полюс и фазу $q = 2,25$)

Колебания электромагнитного момента являются следствием малого числа пазов на полюс и фазу q , что несколько смягчается применением дробного q , как было отмечено выше. Данная рекомендация была подтверждена полевым моделированием (рис. 2, 3).

Анализ полученных результатов (рис. 3) показывает, что при числе пазов на полюс и фазу $q = 2$ размах колебаний электромагнитного момента равен 25 % от номинального. Применение дробного $q = 2,25$ привело к снижению размаха колебаний до 5 % (рис. 2, 3). Отметим, что увеличение q и числа пазов статора Z_1 может привести к чрезмерному истончению зубцов и углублению паза, т.е. к ухудшению механической прочности, чрезмерному насыщению стали зубцов и увеличению индуктивного сопротивления рассеяния статора.

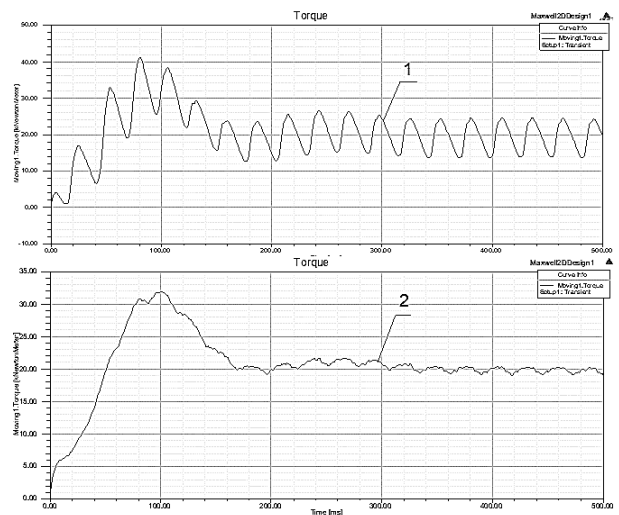


Рис. 3. Результаты полевого моделирования пуска обращенного СДПМ в Ansys Maxwell: 1 – при пуске обращенного СДПМ с числом пазов на полюс и фазу $q = 2$; 2 – при пуске обращенного СДПМ с числом пазов на полюс и фазу $q = 2,25$

Важным этапом поверочных расчетов электрической машины с постоянными магнитами является тепловой расчет. Точный расчет температуры частей машины, охлаждаемых потоками вязкого хладагента, требует расчета системы уравнений Навье-Стокса в трехмерной постановке. Подобные расчеты являются сложными, затратными и очень длительными. В настоящей работе тепловой расчет выполнен в среде Elcut методом полевого моделирования стационарного температурного поля. Создана тепловая осесимметричная модель СДПМ электропривода лебедочных механизмов. Принят ряд допущений. Исходя из того, что хладагент равномерно перемешан, теплопроводность его подобрана таким образом, чтобы разница температур в хладагенте не превышала 10°C . Охлаждение машины идет массопереносом нагретых частиц от лобовых частей к ротору-барабану и подшипниковым щитам. Граничные условия на поверхности корпуса СДПМ заданы коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 20 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$, рассчитанным для номинальной частоты вращения. Результаты расчета стационарного температурного поля представлены на рис. 4.

На рис. 4 стрелками представлено векторное поле теплового потока. Указаны точки, в которых контролируется значение температуры. Локальные значения температуры в указанных точках представлены в табл. 2.

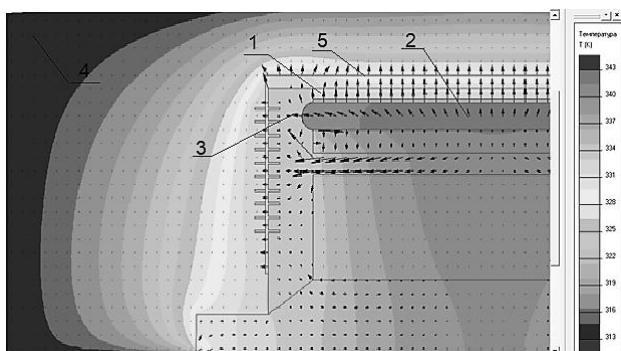


Рис. 4. Картина температурного стационарного поля в номинальном режиме работы СДПМ

Таблица 2. Локальные значения температуры в узлах СДПМ на полевой модели

Номер точки	Узел полевой модели	Температура, °К
1	Постоянный магнит	335
2	Обмотка статора	342
3	Хладагент	339
4	Внешний воздух на периферии модели	313
5	Поверхность внешнего ротора	330

Температура обмотки статора $69\text{ }^{\circ}\text{C}$ не превышает предельно допустимой величины для класса изоляции В – $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура трансформаторного масла $66\text{ }^{\circ}\text{C}$, что также не превышает рекомендованного предела в $95\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чувствительные к температуре высокоэнергетические магниты из сплава NeFeB перегреты относительно окружающего воздуха на $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Перегрев приводит к падению коэрцитивной силы H_C на $13,2\%$ и остаточной индукции B_r на $2,42\%$. Отметим, что указанный спад величины H_C и B_r не является критическим, хотя и негативно сказывается на перегрузочной способности двигателя, коэффициенте мощности и КПД [12].

Анализ картины температурного поля показывает, что воздух с торцов машины подогрет сильнее, чем у цилиндрической поверхности барабана. Это свидетельствует о том, что большая доля теплового потока уходит с торцевых поверхностей барабана, но не с радиальных. Указанное свойство конструкции СДПМ положительно сказывается на перегреве магнитов и свидетельствует о правильно подобранном соотношении главных размеров и целесообразности направления теплового потока в область подшипниковых щитов [12].

Выводы. В результате дополнения и изменения существующих методик проектирования синхронных машин с магнитным и электромагнитным возбуждением [6, 7] решена проблема отсутствия специализированной инженерной методики проектирования СДПМ привода лебедки. Проведенные инженерные поверочные расчеты показывают, что адаптированные для проектирования обращенных СДПМ электропривода лебедочных механизмов методики позволяют получить проект двигателя, соответствующий требованиям ТЗ и особенностям эксплуатации. Достоверность результатов проверена с помощью полевого моделирования электромеханических процессов и теплового состояния СДПМ в средах Ansys Maxwell и Elcut.

Список литературы

1. Казаков Ю.Б. Энергоэффективность работы электродвигателей и трансформаторов при конструктивных и режимных вариациях: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2013. – 152 с.
2. Силовые полупроводниковые преобразователи для питания синхронных реактивных электроприводов и обеспечение электробезопасности персонала, обслуживающего эти установки / М.А. Григорьев, А.Е. Бычков, Е.В. Белусов и др. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2014. – 99 с.
3. Захаренко А.Б., Семенчуков Г.А. Исследование синхронной электрической машины со сколом постоянных магнитов // Электротехника. – 2007. – № 2. – С. 21–25.
4. Меньшов Б.Г., Яризов А.Д., Ершов М.С. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности: учеб. для вузов. – М.: ОАО «Издательство Недр», 2000. – 487 с.
5. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
6. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.
7. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.
8. Мартынов В.А., Голубев А.Н. Моделирование электромагнитных процессов в многофазных синхронных двигателях с постоянными магнитами // Электричество. – 2013. – № 9. – С. 37–41.
9. Геометрические соотношения в вентильном двигателе с постоянными магнитами /

И.Н. Радимов, В.В. Рымша, Т.Т.Х. Чан, З.П. Протина // *Электротехника і електромеханіка*. – 2008. – № 5. – С. 26–28.

10. **Разработка** синхронного двигателя с постоянными магнитами на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / А.Н. Петренко, В.Е. Плюгин, Н.Я. Петренко, В.П. Шайда // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2016. – № 22 (98). – С. 111–115.

11. **Голландцев Ю.А., Иванов В.Г., Турусов С.Н.** Обращенные вентильные двигатели с высококоэрцитивными постоянными магнитами // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. – 2012. – № 5 (157). – С. 88–92.

12. **Сахаров М.В., Караулов В.Н.** Анализ конструкции, электромеханических и тепловых процессов в обращенном СДПМ // *Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «XIX Бенардосовские чтения»*. Т. 3. – Иваново, 2017. – С. 173–175.

References

1. Kazakov, Yu.B. *Energoeffektivnost' raboty elektrodvigatelay i transformatorov pri konstruktivnykh i rezhimnykh variatsiyakh* [Energy efficiency of operation of electric engines and transformers with design and regime variations]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2013. 152 p.

2. Grigor'ev, M.A., Bychkov, A.E., Belousov, E.V. *Silovye poluprovodnikovye preobrazovateli dlya pitaniya sinkhronnykh reaktivnykh elektroprivodov i obespechenie elektrobezopasnosti personala, obsluzhivayushchego eti ustanovki* [Power semiconductor converters for the supply of synchronous reactive electric drives and provision of electrical safety for the maintenance personnel of these installations]. Chelyabinsk: Izdatel'skiy tsentr YuUrGU, 2014. 99 p.

3. Zakharenko, A.B., Semenchukov, G.A. *Issledovanie sinkhronnoy elektricheskoy mashiny so skosom postoyannykh magnitov* [A study of the synchronous electric machine with a permanent magnet bevel]. *Elektrotehnika*, 2007, no. 2, pp. 21–25.

4. Men'shov, B.G., Yarizov, A.D., Ershov, M.S. *Elektrotekhnicheskie ustanovki i komplekсы v neftegazovoy promyshlennosti* [Electrotechnical facilities in oil and gas industry]. Moscow: OAO «Izdatel'stvo Nedra», 2000. 487 p.

5. Balagurov, V.A., Galteev, F.F. *Elektricheskaya generatory s postoyannymi magnitami* [Electric generators with permanent magnets]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 280 p.

6. Balagurov, V.A. *Proektirovanie spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Design of special ac electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 272 p.

7. Kopylov, I.P., Klokov, B.K., Morozkin, V.P., Tokarev, B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 2002. 757 p.

8. Martynov, V.A., Golubev, A.N. *Modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v mnogofaznykh sinkhronnykh dvigatelyakh s postoyannymi magnitami* [Simulation of electromagnetic processes in multiphase synchronous motors with permanent magnets]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 9, pp.37–41.

9. Radimov, I.N., Rymsha, V.V., Chan, T.T.Kh., Protsina, Z.P. *Geometricheskie sootnosheniya v ventil'nom dvigatele s postoyannymi magnitami* [Geometric relations in the permanent magnet valve motor]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2008, no. 5, pp. 26–28.

10. Petrenko, A.N., Plyugin, V.Ye., Petrenko, N.Ya., Shayda, V.P. *Razrabotka sinkhronnogo dvigatelya s po-stoyannymi magnitami na baze asinkhronnogo dvigatelya s korotkozamknutym rotorom* [Development of a synchronous motor with permanent magnets based on an asynchronous motor with a squirrel cage rotor]. *Elektrotekhnicheskieskie i komp'yuternye sistemy*, 2016, no. 22(98), pp. 111–115.

11. Gollandtsev, Yu.A., Ivanov, V.G., Turusov, S.N. *Obrashchennyye ventil'nye dvigateli s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami* [Inverted valve motors with high-performance permanent magnets]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekomunikatsii. Upravlenie*, 2012, no. 5(157), pp. 88–92.

12. Sakharov, M.V., Karaulov, V.N. *Analiz konstruktii, elektromekhanicheskikh i teplovykh protsessov v obrashchenom SDPM* [Analysis of design, electromechanical and thermal processes of inverted PMSM]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «XIX Benardosovskie chteniya»*. Т. 3 [Proceedings of the International scientific and technical conference «XIX Benardos readings». Vol. 3]. Иваново, 2017, pp.173–175.

Караулов Виктор Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, e-mail: karaulov@em.ispu.ru

Karaulov Viktor Nikolayevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electromechanics Department, e-mail: karaulov@em.ispu.ru

Сахаров Матвей Васильевич,

ООО «Эльмаш (УЭТМ)» (г. Екатеринбург), магистр, специалист ИЦ ОГК ТРО, e-mail: sakharov_mv@uetm.ru

Sakharov Matvey Vasilyevich,

JSC «Elmash (UETM)», Master of Electric Power Engineering and Electrical Engineering, Specialist of Transformers chief design department, e-mail: sakharov_mv@uetm.ru