

УДК 621.313.84

Данил Сергеевич Тарицын

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: TaritsynDS@mpei.ru

Олег Николаевич Молоканов

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов, Россия, Москва, e-mail: MolokanovON@mpei.ru

Магнитная передача с магнитной системой Хальбаха для вспомогательных приводов¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. На тепловозе от одного дизельного двигателя необходимо с минимальным расходом энергии приводить значительное число агрегатов, имеющих разную номинальную частоту вращения. Используемые в настоящее время механические и гидравлические приводы требовательны к обслуживанию и качеству масла, электрические приводы громоздки и имеют меньший КПД. На примере тормозного компрессора предлагается внедрить в привод вспомогательных агрегатов бесконтактную магнитную передачу с магнитной системой Хальбаха для повышения надежности и энергоэффективности. При этом вспомогательные приводы, и в частности привод компрессора, должны иметь небольшое передаточное число ($i = 2...5$) для обеспечения необходимой частоты вращения. Исследования магнитных передач такого рода уже проводились, однако ни в одном исследовании не были представлены рекомендуемые относительные значения параметров геометрии магнитной системы, по которым можно было бы спроектировать магнитную передачу на заданный номинальный момент.

Материалы и методы. Электромагнитные явления в магнитной передаче исследованы с помощью плоской полевой модели с использованием уравнений Максвелла. Расчет выполнен методом конечных элементов. Для получения максимально компактной конструкции применена многофакторная оптимизация геометрических параметров магнитной передачи с магнитной системой Хальбаха по методу Нелдера–Мида.

Результаты. Исследованы электромагнитные явления в магнитной передаче. Выполнен их расчет. Определены оптимальные относительные геометрические параметры магнитной системы. Проведено сравнение стоимости активных материалов, в результате которого установлено, что стоимость единицы момента в передаче с магнитной системой Хальбаха ниже на 4,4 %.

Выводы. В результате внедрения магнитной системы Хальбаха плотность момента удалось повысить на 39,4 %, что позволяет пропорционально уменьшить магнитную передачу в объеме для получения того же момента на выходе. Полученные оптимальные геометрические параметры магнитной системы могут быть использованы как рекомендуемые для проектирования магнитных передач с высокой плотностью момента. Достигнута плотность момента 330 кН·м/м³. Магнитную систему Хальбаха наиболее эффективно размещать на статоре: она позволяет отказаться от магнитопровода, и, таким образом, уменьшить объем магнитной передачи без снижения передаваемого момента.

Ключевые слова: магнитная передача, постоянный магнит, магнитная система Хальбаха, плотность момента, диагностика электрических машин

Danil Sergeevich Taritsyn

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Postgraduate of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: TaritsynDS@mpei.ru

Oleg Nikolaevich Molokanov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices Department, Russia, Moscow, e-mail: MolokanovON@mpei.ru

A Halbach array magnetic gear for auxiliary drives

Abstract

Background. A diesel locomotive must drive a significant number of units with different rated rotation speeds from a single diesel engine with minimal energy consumption. The mechanical and hydraulic drives currently in use demand high maintenance and specific oil quality, while electric drives are bulky and have lower efficiency. This study proposes the implementation

¹ Результаты получены при выполнении проекта «Комплексная система мониторинга технических, энергетических и воздействующих на человека параметров энергетического объекта» в рамках реализации стратегического технологического проекта «От микросхемы до системы» при поддержке программы «Приоритет 2030» нацпроекта «Молодежь и дети».

The results have been obtained during the implementation of the project "Integrated system for monitoring technical, energy and human-impacting parameters of an energy facility" within the framework of the strategic technological project "From microcircuit to system" with the support of the "Priority 2030" program of the national project "Youth and Children".

of a contactless magnetic gear with a Halbach array in the auxiliary unit drive system, using the brake compressor as an example, to improve reliability and energy efficiency. At the same time these auxiliary drives, particularly the compressor drive, require a low gear ratio ($u = 2...5$) to ensure the required rotation speed. While studies of such magnetic gears have been conducted, none of the existing studies have provided recommended relative values for the magnetic system geometric parameters that could be used to design a magnetic gear for a specified rated torque.

Materials and methods. Electromagnetic phenomena in the magnetic gear have been studied using a 2D field model based on Maxwell's equations. The calculations have been performed using the finite element method. To achieve a maximum compact design, multi-factor optimization of the geometric parameters of the magnetic gear with the Halbach array has been carried out according to Nelder-Mead method.

Results. Electromagnetic phenomena in magnetic gear have been studied. Their calculations have been performed. The optimal relative geometric parameters of the magnetic system have been determined. A comparison of the cost of active material has been conducted, revealing that the cost of a unit of torque in the gear with the Halbach array is 4,4 % lower.

Conclusions. As a result of the implementation of the Halbach array, the torque density has been increased by 39,4 %, allowing for a proportional reduction in the volume of the magnetic gear while maintaining the same output torque. The obtained optimal geometric parameters of the magnetic system can be used as recommendations to design magnetic gear with high torque density. A torque density of 330 kN·m/m³ has been achieved. Placing the Halbach array on the stator is the most effective configuration. It allows us to eliminate magnetic circuit, thereby reducing the volume of the magnetic gear without compromising the transmitted torque.

Key words: magnetic gear, permanent magnet, Halbach array, torque density, electrical machine diagnostics

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.066-074

Введение. В различных транспортных машинах существует необходимость привода множества различных агрегатов от одного двигателя, при этом каждый из этих агрегатов может иметь свою номинальную частоту вращения. Габариты машинных отсеков чаще всего стеснены, а передаваемые мощности в связи с развитием науки и техники непрерывно увеличиваются. Растут также и требования к надежности транспортных машин, к их невосприимчивости к тяжелым условиям работы.

Например, на тепловозах серии ТЭ10 всех индексов от ДВС приводятся тяговый генератор, тормозной компрессор, вентиляторы охлаждения тяговых электродвигателей и теплового двигателя, возбуждатель, подвозбудитель и вспомогательный генератор. Эти механизмы в настоящее время исполняются в виде зубчатых или гидромеханических редукторов, а на некоторых тепловозах – в виде отдельных электроприводов [1, 2].

Среди проблем зубчатых редукторов можно выделить механический износ, потребность в смазке. Гидропередачи требовательны к качеству масла, для них в некоторых случаях требуется предусматривать охлаждение рабочей жидкости, а также следить за состоянием уплотнений и герметичностью корпуса. Электроприводы имеют большой вес, дороги и материалоемки. В случае электропривода постоянного тока повышенного внимания требует коллектор [3]². В случае электропривода переменного тока требуется сложный преобразователь, который может создавать электромагнитные помехи [4].

Одним из возможных путей повышения надежности и экономичности вспомогательных приводов является внедрение бесконтактных магнитных передач. Конструкция магнитной передачи показана на рис. 1. Она состоит из

неподвижного статора с числом пар полюсов – постоянных магнитов p_s , тихоходного колеса – модулятора с числом магнитопроводящих сегментов z_m , и быстроходного колеса – ротора с числом пар полюсов p_r . У таких передач отсутствует механический контакт в области зацепления, они функционируют благодаря бесконтактному силовому взаимодействию магнитных полей. Эта особенность позволяет магнитным передачам обеспечивать принципиально более высокие эксплуатационные характеристики – надежность, стойкость к неблагоприятным погодным условиям и перегрузкам, бесшумность.

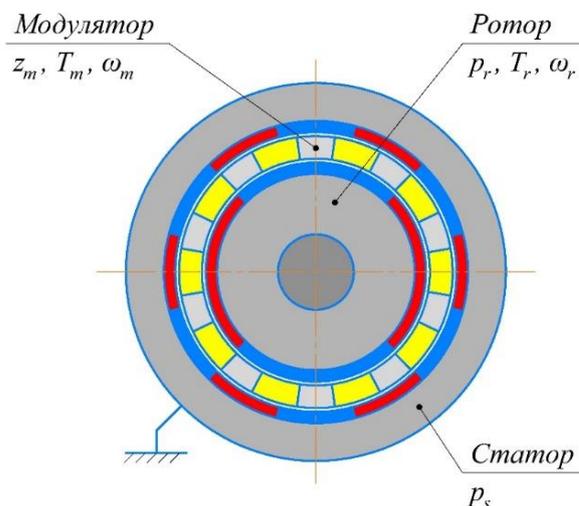


Рис. 1. Коаксиальная магнитная передача

Основные задачи по адаптации конструкции магнитных передач для использования на тепловозе – достижение высокой плотности момента для вписывания в стесненный габарит, обеспечение небольшой величины пульсаций и высокого

² Руководство по техническому обслуживанию и текущему ремонту тепловозов 2ТЭ25КМ. В 4 ч. – Брянск: Брянский машиностроительный завод, 2015.

КПД [5]. Достижение высоких технических характеристик магнитной передачи достигается в первую очередь оптимизацией геометрии магнитной системы – подбором таких размеров конструктивных элементов, при которых достигается наивысшая плотность момента [6]. Ранее была рассмотрена задача по нахождению оптимальных параметров магнитной системы, которая состояла только из радиально-намагниченных магнитов, и получена максимальная плотность момента по активным частям $200 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ [7].

Однако следует заметить, что полученная в [7] плотность момента рассчитана исходя из объема только активных частей магнитной передачи, если же для расчета принимать весь объем передачи с корпусными элементами, она может быть в 2–4,5 раза меньше в зависимости от особенностей конструкции [8, 9].

По чертежам и техническим данным [1] локомотива ТЭ10М требуемая плотность момента с учетом корпусных элементов была оценена в $105\text{--}110 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$, что при достаточно высоком уровне проектирования будет требовать плотности момента по активным частям передачи $250\text{--}400 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$. Этим обосновано продолжение поиска оптимальных вариантов геометрии магнитной системы для достижения заданных массогабаритных показателей.

В [10] приводится вариант магнитной системы, в котором магниты с радиальным намагничиванием чередуются с магнитами, намагниченными тангенциально – магнитная система Хальбаха (рис. 2).

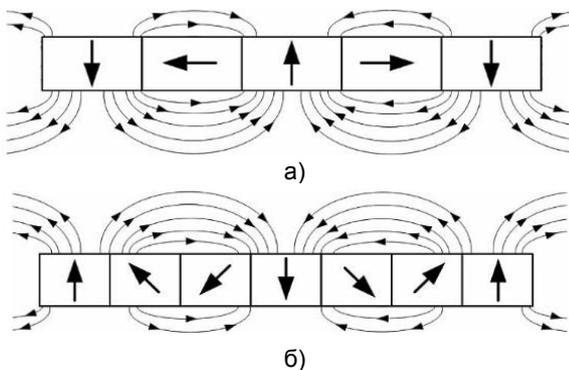


Рис. 2. Варианты расположения магнитов в магнитной системе Хальбаха: а – два сегмента на полюс; б – три сегмента на полюс

Преимущество данной конструкции в том, что тангенциальные магниты выполняют по сути роль сердечника, поэтому его размеры можно принимать минимальными. Это позволит в тех же габаритах увеличить диаметры воздушных зазоров и, таким образом, повысить плотность момента [11]. Вариант б сложен для производства и потому рассматриваться не будет. Для варианта а будет проведено сравнение стоимости единицы момента с аналогичным показателем передачи с обычной магнит-

ной системой в целях определения целесообразности применения передач с магнитной системой Хальбаха на производстве.

В [12] описывается циклоидальная магнитная передача с магнитной системой Хальбаха и плотностью момента $475 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$. Диапазон исследуемых передаточных чисел – от 10 до 40. Однако авторы обращают внимание на наличие больших некомпенсированных радиальных сил в данной конструкции. Кроме того, такие передаточные числа не подходят для рассматриваемых в настоящем исследовании приводов. В [13] описывается коаксиальная магнитная передача, в которой неподвижным является модулятор, а внешнее магнитное колесо, которое в настоящем исследовании определено как статор, является подвижным и ведомым звеном. При этом на роторе применена магнитная система Хальбаха, на внешнем колесе магниты расположены в виде спиц и намагничены тангенциально. Плотность момента составила $73,44 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$.

Цель исследования: теоретическое обоснование целесообразности применения магнитной системы Хальбаха в магнитной передаче для привода вспомогательных устройств в стесненных габаритах на примере тепловоза.

Задачи.

1. Используя ранее полученный в [7] оптимальный вариант геометрии магнитной системы передачи с радиально-намагниченными магнитами в качестве начального приближения, выполнить оптимизационное моделирование для комбинации магнитной системы Хальбаха на статоре и обычной магнитной системы на роторе.

2. Аналогично предыдущему пункту провести моделирование для комбинации магнитной системы Хальбаха на роторе и обычной магнитной системы на статоре.

3. Провести моделирование магнитной системой Хальбаха и на роторе, и на статоре с использованием результатов из пп. 1 и 2.

4. Для пунктов 1–3 выбрать геометрию, позволяющую получить наибольшую плотность момента, и для нее рассчитать стоимость единицы момента по активным материалам, сравнить с аналогичным показателем для магнитной передачи с радиальными магнитами.

Исходные данные. Исследование нацелено на улучшение предложенной в [7] магнитной передачи для привода тепловозного компрессора КТ-6 [14]. Типичные параметры: передаточное число $2,2\pm 0,1$ и максимальный момент $2 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Высота вала компрессора – 335 мм, а осевая длина – 500 мм, соответственно, габариты магнитной передачи с учетом корпуса не должны превышать эти величины.

Уменьшение габаритов передачи позволит использовать ее в еще более компактных приводах, например приводе главного вентилятора дизеля.

Методы исследования. В настоящем исследовании механические потери рассматриваться не будут, поэтому плотность момента будет определяться исходя из электромагнитного момента. Для оценки массогабаритных показателей магнитных передач используется такой показатель, как плотность момента [5].

Плотность момента, Н·м/м³, рассчитывается как

$$\rho_T = \frac{T_{em}}{V_a}, \quad (1)$$

где T_{em} – электромагнитный момент тихоходного звена, Н·м; V_a – объем магнитной системы:

$$V_a = \frac{\pi D^2}{4} l, \quad (2)$$

где l – осевая длина магнитной системы, м; D – внешний диаметр статора, м.

В [15] рассматривается метод аналитического расчета магнитной передачи, однако рассчитать с его помощью поля сложной конфигурации и возникающие от их взаимодействия моменты затруднительно. В связи с этим расчет будет проводиться по следующей методике [5].

Электромагнитный момент определяется по формуле

$$\mathbf{T}_{em} = \int_{S_r} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times \mathbf{f} dS, \quad (3)$$

где S_r – замкнутая поверхность, для которой определяется электромагнитный момент (в нашем случае – цилиндр, боковая поверхность которого проходит посередине воздушного зазора); \mathbf{r}_0 – координата центра вращения относительно начала системы координат, м; \mathbf{r} – координата рассматриваемого элементарного участка поверхности относительно начала системы координат, м; \mathbf{f} – вектор плотности силы, Н/м²:

$$\mathbf{f} = \mu_0 ((\mathbf{nH})\mathbf{H} - 0,5\mathbf{nH}^2), \quad (4)$$

где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля, А/м.

Параметры магнитного поля определяются исходя из магнитных свойств материалов, входящих в магнитную систему, и геометрии магнитной системы по следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{pm} = \mu_0 \mu_{rec} \mathbf{H} + \mathbf{B}_r, \\ \mathbf{B}_{mc} = \mu_0 \mu(\mathbf{H}) \mathbf{H}, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \\ \nabla \times \mathbf{H} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где \mathbf{B}_{pm} – индукция в теле постоянного магнита, Тл; \mathbf{B}_{mc} – индукция в участках магнитопровода, Тл; \mathbf{B} – индукция в точке магнитной системы, Тл; μ_{rec} – магнитная проницаемость магнита (для сплава N45 – 1,05); $\mu(\mathbf{H})$ – магнитная проницаемость участка магнитной цепи в функции напряженности поля; \mathbf{B}_r – остаточная магнитная индукция (для сплава N45 – 1,35 Тл).

В расчете были приняты следующие допущения:

- расчет выполнялся в 2D постановке;
- не учитывались краевые эффекты;
- характеристика намагничивания стали принята нелинейной – учитывалось насыщение стали;
- потери в стали не учитывались.

Для большего удобства представления и анализа результата от внедрения магнитной системы Хальбаха будем оперировать такими параметрами магнитной системы, как ширина магнитопровода статора h_s , ширина модулятора h_m , (рис. 3), относительная ширина сегментов модулятора k_b , коэффициент заполнения полюса радиальными магнитами k_r , а также число пар полюсов и сегментов.

Для выбора оптимального числа пар полюсов и сегментов удобно пользоваться формулами [5]:

$$u = \frac{z_m}{p_r}; \quad (6)$$

$$p_s = z_m - p_r, \quad (7)$$

где p_s – число пар полюсов статора; p_r – число пар полюсов ротора; z_m – число сегментов модулятора; u – передаточное число.

Для получения таких чисел пар полюсов и сегментов, которые обеспечат передаточное число в заданных исходными данными пределах, в первом приближении можно использовать выражения:

$$p_s = p_r + 3; \quad (8)$$

$$z_m = p_s + p_r. \quad (9)$$

Оптимальное с точки зрения максимальной плотности момента число пар полюсов ротора выбирается по результатам однофакторного расчета.

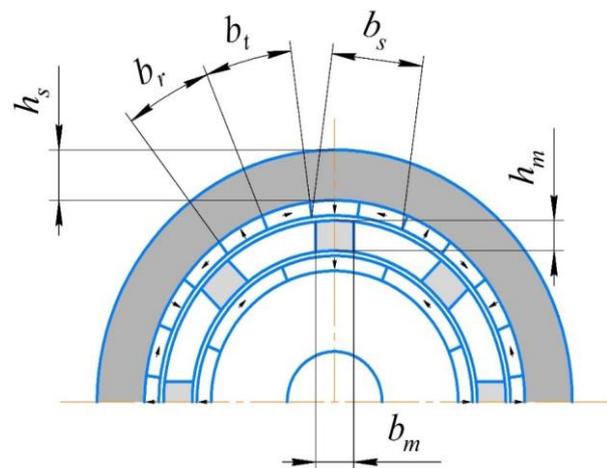


Рис. 3. Оптимизируемые параметры магнитной системы

Коэффициент ширины сегмента модулятора относительно длины хорды полюса статора равен

$$k_b = \frac{b_m}{b_s}, \quad (10)$$

где b_m – ширина сегмента модулятора, м; b_s – длина хорды полюса статора, м.

Из (10) следует:

$$b_m = k_b b_s. \quad (11)$$

Наибольший интерес представляет коэффициент заполнения полюса радиальными магнитами:

$$k_{fr} = \frac{b_r}{b_r + b_t}, \quad (12)$$

где b_r – ширина радиально намагниченного полюсного сегмента, м; b_t – ширина тангенциально намагниченного полюсного сегмента, м.

Результаты исследования. Применение магнитной системы Хальбаха на статоре. Определение начальных приближений для оптимизационного расчета. На первом этапе выполнено построение геометрии с произвольными параметрами для оценки плотности момента до оптимизации. Картина магнитной индукции показана на рис. 4.

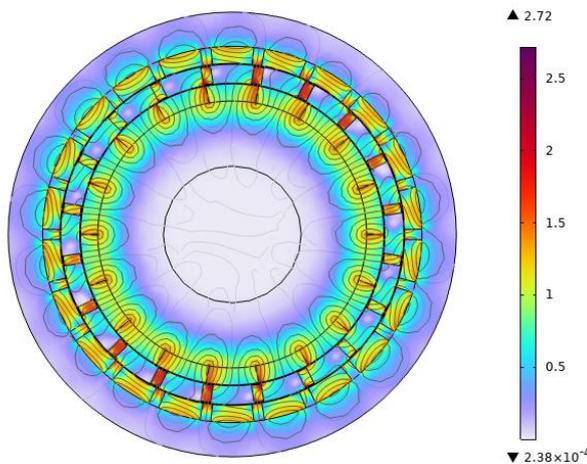


Рис. 4. Картина магнитной индукции до оптимизации

Предварительные значения геометрических параметров представлены в табл. 1. Максимальный момент составил $92 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$.

Предварительные параметры передачи с магнитной системой Хальбаха на статоре для привода вспомогательного механизма. Анализ достигнутых в [7] результатов позволяет сделать вывод, что для достижения максимальной плотности момента ширину модулятора h_m следует делать минимально возможной по условиям прочности и технологичности. В настоящем исследовании она будет принята равной 8 мм.

Таблица 1. Предварительные параметры передачи с магнитной системой Хальбаха на статоре для привода вспомогательного механизма

Параметр	Значение
Передаточное отношение u	2,222
Число пар полюсов ротора p_r	9
Число пар полюсов статора p_s	11
Число сегментов модулятора z_m	20
Внешний диаметр статора D_s , м	0,26
Относительная ширина сегментов модулятора k_b	0,2
Ширина модулятора h_m , м	0,01
Коэффициент заполнения полюса радиальными магнитами k_{fr}	0,2
Ширина магнитопровода статора h_s , м	0,02

По результатам исследования зависимости среднего электромагнитного момента на модуляторе от числа пар полюсов ротора при изменении чисел пар полюсов статора и сегментов модулятора по зависимостям (8) и (9) (рис. 5) выявлено, что оптимальные числа пар полюсов и сегментов будут больше, чем у магнитной передачи с обычной системой радиально намагниченных магнитов – 15 против 9 на роторе, 18 против 11 на статоре и 33 против 20 на модуляторе.

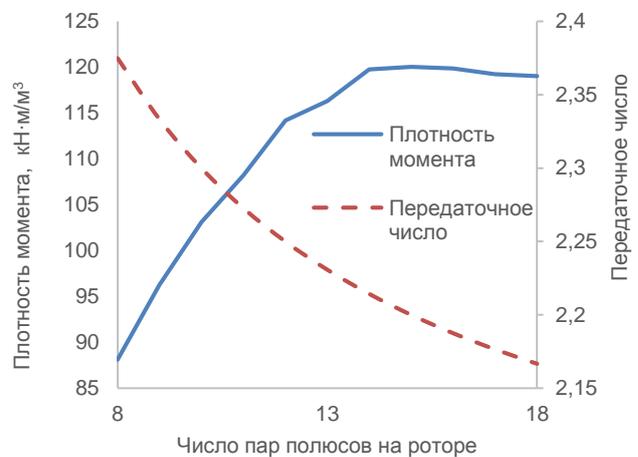


Рис. 5. Зависимость электромагнитного момента модулятора от числа пар полюсов ротора

Также были построены однофакторные зависимости среднего электромагнитного момента от относительной ширины сегментов модулятора (рис. 6), коэффициента заполнения полюса радиальными магнитами (рис. 7) и ширины магнитопровода статора (рис. 8). Во всех случаях наружный диаметр статора и осевая длина магнитной системы поддерживались постоянными.

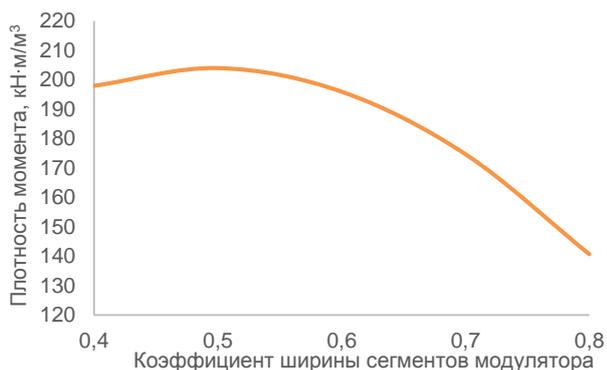


Рис. 6. Зависимость электромагнитного момента модулятора от относительной ширины сегментов модулятора

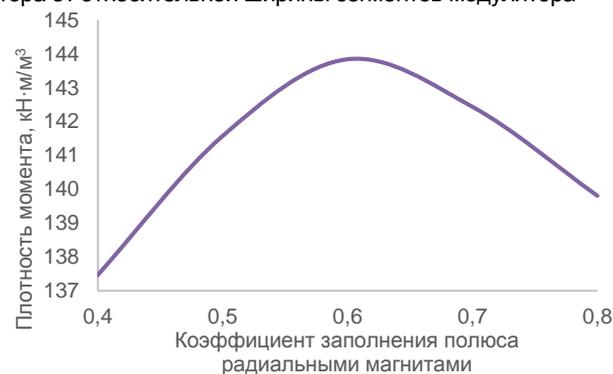


Рис. 7. Зависимость электромагнитного момента модулятора от коэффициента заполнения полюса радиальными магнитами

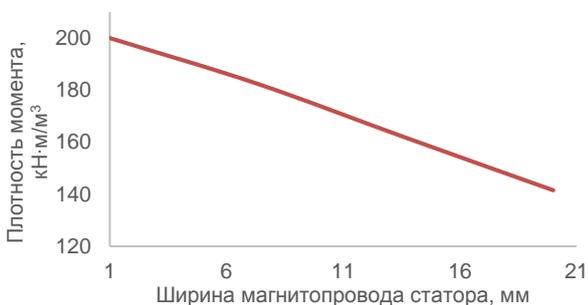


Рис. 8. Зависимость электромагнитного момента модулятора от ширины магнитопровода статора

По данным графикам были выбраны оптимальные интервалы параметров, которые использовались в качестве начального приближения (табл. 2). Анализ полученных зависимостей (рис. 8) показывает, что при установке магнитной системы Хальбаха магнитопровод статору не требуется.

Оптимизационный расчет. На третьем этапе выполнена многомерная оптимизация геометрических параметров магнитной системы по методу Нелдера–Мида для определения максимально достижимой плотности момента и выбора габаритов с учетом требуемого момента. В качестве целевой функции было задано условие максимизации плотности электромагнитного момента. Изменяемыми параметрами стали относительная ширина сегментов модулятора k_b , коэф-

фициент заполнения полюса радиальными магнитами k_{fr} . Картина магнитной индукции показана на рис. 9, параметры геометрии по результатам оптимизации сведены в табл. 2 (правый столбец).

Таблица 2. Параметры передачи с магнитной системой Хальбаха на статоре для привода вспомогательного механизма

Параметры	Начальное приближение	Результат оптимизации
Неизменяемые параметры		
Передающее отношение u	2,2	
Число пар полюсов ротора p_r	15	
Число пар полюсов статора p_s	18	
Число сегментов модулятора z_m	33	
Внешний диаметр статора D_s , м	0,26	
Ширина модулятора h_m , м	0,008	
Оптимизируемые параметры		
Относительная ширина сегментов модулятора k_b	0,4–0,6	0,557
Коэффициент заполнения полюса радиальными магнитами k_{fr}	0,5–0,7	0,501

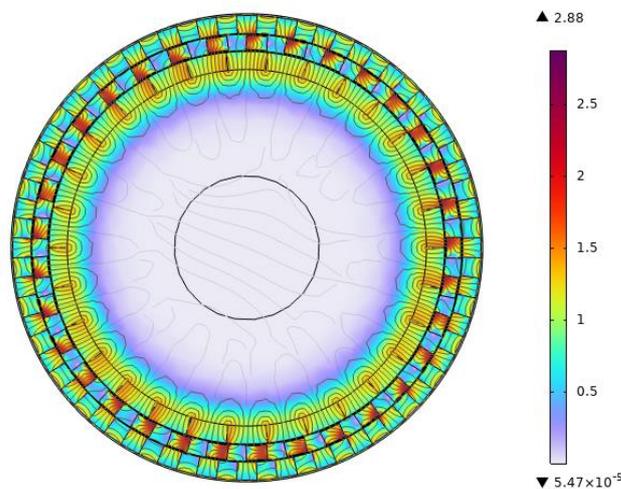


Рис. 9. Картина магнитной индукции

Поскольку тангенциально намагниченные магниты на статоре выполняют функцию магнитопровода, статору не требуется сердечник и магниты могут быть закреплены непосредственно на корпус. За счет этого достигается как увеличение объема магнитов при том же объеме передачи, так и увеличение средних диаметров магнитных колес. Согласно (3), при увеличении расстояния от центра вращения до места приложения электромагнитных сил увеличивается развиваемый ими момент. Благодаря этому в меньшем объеме передачи может быть

получен бóльший передаваемый момент. В данном варианте конструкции плотность момента достигла $330 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$, что больше первоначального результата ($92 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{м}^3$) в 3,6 раза. По сравнению с высокооптимальной магнитной передачей с обычной магнитной системой объем устройства может быть уменьшен на 39,4 %.

Моделирование передачи с магнитной системой Хальбаха на роторе. При моделировании магнитной системы Хальбаха на роторе и обычной магнитной системы на статоре еще на этапе определения начальных приближений было выяснено, что со снижением коэффициента заполнения полюсов ротора радиально намагниченными магнитами плотность момента будет падать (рис. 10).

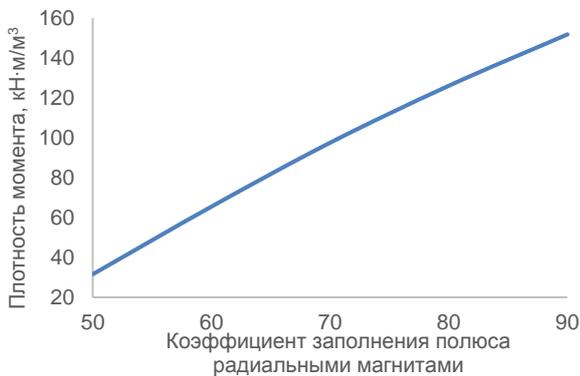


Рис. 10. Зависимость электромагнитного момента модулятора от коэффициента заполнения полюса радиальными магнитами для ротора

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что установка тангенциально намагниченных магнитов на ротор не даст выигрыша по плотности момента, поэтому нет смысла усложнять конструкцию ротора.

Итоговые параметры геометрии магнитной системы. Таким образом, для дальнейшей разработки имеет смысл принять конструкцию, включающую магнитную систему Хальбаха на статоре и обычную магнитную систему на роторе. Оптимальные геометрические параметры, отраженные в табл. 2, представим в относительном виде, отнесенном к внешнему диаметру статора (табл. 3).

Таблица 3. Итоговые параметры передачи с магнитной системой Хальбаха в относительном виде

Параметр	Абсолютное значение, мм	Относительное значение
Ширина сегментов модулятора k_b	11,6	0,56
Ширина радиальных магнитов k_r	10,4	0,5
Средний диаметр внутреннего воздушного зазора D_{IAGM}	109,5	0,84
Средний диаметр внешнего воздушного зазора D_{OAGM}	118,5	0,91

С учетом полученной плотности момента для выполнения требований, представленных в исходных данных, был принят наружный диаметр статора 220 мм и осевая длина 170 мм.

Оценка материалоемкости магнитной системы Хальбаха. С точки зрения практического применения интерес представляет не только высокий удельный момент, но и итоговая стоимость единицы момента. В настоящем исследовании проведено сравнение стоимости активных материалов, необходимых для изготовления приведенной в [7] магнитной передачи и передачи с магнитной системой Хальбаха. Для расчетов стоимость 1 кг магнитного сплава N45 принята равной 90 \$, а стали 2421 – 1,41 \$. Стоимость рассчитывалась для двух вариантов, предназначенных для передачи максимального момента 2 кН·м. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Сравнение стоимости магнитных передач

Магнитная система	Масса активных материалов, кг	Стоимость активных материалов, \$	Стоимость единицы момента, \$/кН·м
Обычная	57,4	1406,9	703,4
Хальбаха	35,7	1345,7	672,8

Таким образом, масса активных материалов снизилась на 37,8 %, стоимость единицы момента – на 4,4 %, что говорит о целесообразности внедрения предлагаемой конструкции.

Диагностика эксцентриситета ротора в магнитной передаче с магнитной системой Хальбаха. Важным вопросом нормального функционирования магнитной передачи в составе привода является своевременная диагностика неисправностей. Одним из вариантов таких неисправностей может стать эксцентриситет ротора, появившийся в результате изгиба быстрходного вала. Такая неисправность может появиться в результате работы привода в условиях сильных вибраций, например как в рассматриваемом приводе, при разбалансировке дизеля. Для изучения поведения магнитной передачи при проявлении такой неисправности в выше описанную модель был введен эксцентриситет. Как показали расчеты, вращающие моменты не изменились, но появилась несбалансированная радиальная сила (рис. 11).

Анализ графика показывает, что по мере увеличения эксцентриситета увеличивается величина и пульсации некомпенсированной радиальной силы. Данная сила возникает в результате одностороннего магнитного тяжения и создает нагрузку на подшипники. Внешне это будет проявляться в виде вибрации, шума и нагрева подшипников в результате их перегрузки. Отслеживать эти параметры можно на слух, на ощупь и при помощи пирометра.

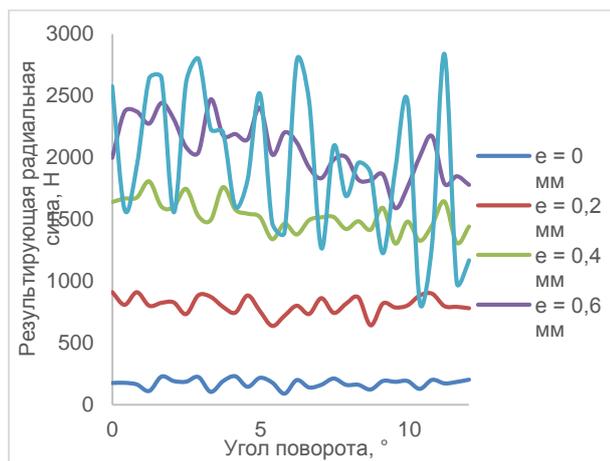


Рис. 11. Форма кривых радиальных сил при различном эксцентриситете ротора

Выводы. Анализ результатов расчета показывает, что внедрение магнитной системы Хальбаха на статор позволяет сократить объем магнитной системы на 39,4 %, массу на 37,8 %, стоимость единицы момента на 4,4 %. То есть применять такую магнитную систему на статоре целесообразно – благодаря этому можно отказаться от магнитопровода статора. Установка же такой конструкции на ротор не дает увеличения плотности момента и потому нецелесообразна. Отмечено, что в рассматриваемых условиях эксплуатации может возникать такая неисправность, как эксцентриситет ротора. В качестве возможных путей оперативной диагностики следует отметить осмотр и прослушивание магнитной передачи в работающем состоянии, а также термометрию подшипников.

Список литературы

1. **Филонов С.П., Зиборов А.Е., Ренкунас В.В.** Тепловозы 2ТЭ10М, 3ТЭ10М: Устройство и работа. – М.: Транспорт, 1986. – 288 с.
2. **Филонов С.П., Гибалов А.И., Никитин Е.А.** Тепловоз 2ТЭ116. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1996. – 334 с.
3. **Шаройко П.М., Середя В.Т.** Гидравлические передачи тепловозов. – М.: Транспорт, 1969. – 160 с.
4. **Анализ** особенностей эксплуатации частотно-регулируемого электропривода компрессора вагона метро / В.Н. Остриров, А.С. Анучин, А.А. Габидов, Д.В. Репецкий // Промышленная энергетика. – 2013. – № 9. – С. 14–16.
5. **Молоканов О.Н.** Разработка оптимальной конструкции и методов расчета бесконтактной магнитной передачи. – М.: на правах рукописи, 2017. – 153 с.
6. **Magnetic gear: Radial force, cogging torque, skewing and optimization** / G. Jungmayr, J. Loeffler, B. Winter, et al. // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Montreal, QC, Canada, 2015. – P. 898–905. DOI: 10.1109/ICEM.2016.7475900.
7. **Taritsyn D.S., Molokanov O.N., Orlov D.A.** Development of Magnetic Transmission for Auxiliary Drives // 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering

(REEPE). – Moscow, 2025. – P. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10970764.

8. **Experimentally Testing a Halbach Rotor Coaxial Magnetic Gear With 279 Nm/L Torque Density** / H.Y. Wong, H. Baninajar, B.W. Dechant, et al. // IEEE Trans. Energy Convers. – March 2023. – Vol. 38, issue 1. – P. 507–518. DOI: 10.1109/TEC.2022.3208320.

9. **Design, Fabrication, Test, and Benchmark of a Magnetically Geared Permanent Magnet Generator for Wind Power Generation** / A.B. Kjaer, S. Korsgaard, S.S. Nielsen, et al. // IEEE Transactions on Energy Conversion. – March 2020. – Vol. 35, issue 1. – P. 24–32. DOI: 10.1109/TEC.2019.2951998.

10. **Jian L., Chau K.T.** A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2010. – Vol. 25, no. 2. – P. 319–328. DOI: 10.1109/TEC.2010.2046997.

11. **Johnson M., Gardner M.C., Toliyat H.A.** Analysis of axial field magnetic gears with Halbach arrays // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). – Coeur d'Alene, ID, USA, 2015. – P. 108–114. DOI: 10.1049/cds2.12023.

12. **Huang H., Qu R., Bird J.** Performance of Halbach Cycloidal Magnetic Gears with Respect to Torque Density and Gear Ratio // 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). – San Diego, CA, USA, 2019. – P. 1977–1984. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785259.

13. **An Asymmetric Pole Coaxial Magnetic Gear With Unequal Halbach Arrays and Spoke Structure** / L. Jing, Z. Huang, J. Chen, R. Qu // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2020. – Vol. 30, no. 4. – P. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2020.2968043.

14. **Меренцев С.П.** Компрессоры локомотивов. – М.: Транспорт, 1974. – 80 с.

15. **Соколова Е.М., Мошинский Ю.А.** Аналитический метод расчета магнитного редуктора // Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий АПЭТ-2017: сб. науч. тр. Междунар. конф., Екатеринбург, 13–16 ноября 2017 года. – Екатеринбург, 2017. – С. 127–130.

References

1. Filonov, S.P., Ziborov, A.E., Renkunas, V.V. *Teplovozy 2TE10M, 3TE10M: ustroystvo i rabota* [Diesel locomotives 2TE10M, 3TE10M series: Design and operation]. Moscow: Transport, 1986. 288 p.
2. Filonov, S.P., Gibalov, A.I., Nikitin, E.A. *Teplovoz 2TE116* [Diesel locomotive 2TE116 series]. Moscow: Transport, 1996. 334 p.
3. Sharoyko, P.M., Sereda, V.T. *Gidravlicheskie peredachi teplovozov* [Hydraulic transmissions of diesel locomotives]. Moscow: Transport, 1969. 160 p.
4. Ostrirov, V.N., Anuchin, A.S., Gabidov, A.A., Repetsky, D.V. *Analiz osobennostey ekspluatatsii chastotno-reguliruemogo elektroprivoda kompressora vagona metro* [Analysis of operational features of a frequency-controlled electric drive for a subway car compressor]. *Promyshlennaya energetika*, 2013, no. 9, pp. 14–16.
5. Molokanov, O.N. *Razrabotka optimal'noy konstruktssii i metodov rascheta beskontaktnoy magnitnoy peredachi* [Development of an Optimal Design and Calculation Methods for a Contactless Magnetic Gear]. Moscow: manuscript, 2017. 153 p.
6. Jungmayr, G., Loeffler, J., Winter, B., Jeske, F., Amrhein, W. *Magnetic gear: Radial force, cogging torque, skewing and optimization*. IEEE Energy Conversion

Congress and Exposition (ECCE). Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 898–905. DOI: 10.1109/ICEM.2016.7475900.

7. Taritsyn, D.S., Molokanov, O.N., Orlov, D.A. Development of Magnetic Transmission for Auxiliary Drives. 2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, 2025, pp. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10970764.

8. Wong, H.Y., Baninajar, H., Dechant, B.W., Southwick, P., Bird, J.Z. Experimentally Testing a Halbach Rotor Coaxial Magnetic Gear With 279 Nm/L Torque Density. *IEEE Trans. Energy Convers.*, March 2023, vol. 38, issue 1, pp. 507–518. DOI: 10.1109/TEC.2022.3208320.

9. Kjaer, A.B., Korsgaard, S., Nielsen, S.S., Demsa, L., Rasmussen, P.O. Design, Fabrication, Test, and Benchmark of a Magnetically Geared Permanent Magnet Generator for Wind Power Generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, March 2020, vol. 35, issue 1, pp. 24–32. DOI: 10.1109/TEC.2019.2951998.

10. Jian, L., Chau, K.T. A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 319–328. DOI: 10.1109/TEC.2010.2046997.

11. Johnson, M., Gardner, M.C., Toliyat, H.A. Analysis of axial field magnetic gears with Halbach arrays.

2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Coeur d'Alene, ID, USA, 2015, pp. 108–114. DOI: 10.1049/cds2.12023.

12. Huang, H., Qu, R., Bird, J. Performance of Halbach Cycloidal Magnetic Gears with Respect to Torque Density and Gear Ratio. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1977–1984. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785259.

13. Jing, L., Huang, Z., Chen, J., Qu, R. An Asymmetric Pole Coaxial Magnetic Gear With Unequal Halbach Arrays and Spoke Structure. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 1–5.

14. Merentsev, S.P. *Kompressory lokomotivov* [Locomotive Compressors]. Moscow: Transport, 1974. 80 p.

15. Sokolova, E.M., Moshchinskiy, Yu.A. Analytical Method for Calculating a Magnetic Gear. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy konferentsii «Aktual'nye problemy elektromekhaniki i elektrotekhnologii APEET-2017», Ekaterinburg, 13–16 noyabrya 2017 goda* [Proceedings of research papers of international conference “Current issues in electromechanics and electrical technology APEET-2017”, Ekaterinburg, 13–16 November 2017]. Ekaterinburg, 2017, pp. 127–130.