

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ВСТРОЕННЫХ БУКСОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

В статье рассматриваются вопросы разработки и исследования магнитных систем буксовых генераторов для автономных систем электропитания комплексов связи, а также диагностики и телеметрии грузовых вагонов. Рост железнодорожных перевозок в настоящий момент предъявляет повышенные требования к уровням безопасности, автоматизации и повышению средней скорости грузовых составов. Данные запросы могут быть решены за счет внедрения современных систем GSM-связи и геолокации. При этом автономное питание необходимо для работоспособности систем фиксации склада грузовых вагонов, передающих информацию о возникновении внештатной ситуации машинисту поезда. Во время движения необходимо постоянно контролировать температуру подшипников буксового узла и передавать данные, в том числе по радиоканалам машинисту поезда и в единую информационную систему. Не менее важны и системы контроля местоположения вагонов и локомотива. Однако одной из проблем в настоящее время является отсутствие автономных источников питания для систем связи и диагностики. В статье рассматривается создание источника питания на основе генератора переменного тока с постоянными магнитами, который позволит повысить степень автономности систем диагностики по сравнению с централизованными системами питания от локомотива. Данный генератор приводится в движение энергией от колесной пары.

**Ключевые слова:** автономный источник, геолокация, диагностика, генератор, грузовой вагон.

**Введение.** Одной из перспективных задач, поставленных руководством российских железных дорог и требующих решения, стало полное использование имеющейся информации об управляемом технологическом процессе перевозок на железнодорожном транспорте. Сегодня уровень использования такой информации недостаточен: контроль технологических процессов обеспечивается только на 30 %, а уровень автоматизации этого процесса составляет около 20 %. В то же время уровень автоматизации европейских железных дорог при использовании системы ERTMS говорит о более высокой степени внедрения информационных систем на транспорте [1–3]. Для контроля за перемещениями составов используются цифровые стандарты связи GSM-R [4–5], особенно актуально применение глобальных навигационных систем при решении вопросов предотвращения хищений и оптимизации логистических задач.

Особенность конструкции грузовых вагонов не предполагает установки габаритных генераторов,

что влечет за собой изменение конструкции ходовой части и влечет дополнительные финансовые затраты, как капитальные, так и эксплуатационные. При этом для пассажирских вагонов вследствие наличия вагонных генераторов вопрос внедрения и использования систем связи и интеграции их в автоматизированные транспортные системы остро не стоит.

**Постановка задачи.** Целью данной статьи является разработка магнитной системы и исследование буксовых генераторов для обеспечения связи, диагностики и телеметрии грузовых вагонов. Объект исследования — автономный генераторный источник напряжения для систем связи, диагностики и телеметрии грузовых вагонов.

В настоящее время автоматизированные системы управления движением грузовых составов, а также мониторинга и диагностики в некоторых источниках называют «интеллектуальным грузовым поездом», который включает в себя т.н. «умный» локомотив и «умный вагон». Система «интеллек-

туальный грузовой поезд» позволяет организовать связь с диспетчерским центром управления поездом, посредством цифровых радиоканалов, через системы спутникового управления движением, а также интегрировать в единое информационное транспортное пространство и логистические системы. Функционал «интеллектуального грузового поезда» также предполагает работу систем управления эксплуатацией, и контроль местоположения вагонов. Эксплуатационный мониторинг предполагает контроль температуры буксового узла, а также выявление дефектов и трещин рамы, возникающих вследствие усталостных явлений, что определяет повышенные требования к безопасности движения.

Независимое позиционирование грузового вагона можно обеспечить только при полностью автономной системе питания, что противоречит концепции центрального электроснабжения от локомотива.

В качестве первичного источника электрической энергии предлагается встроить в буксовый узел синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов [6–8], что предполагает незначительное изменение конструкции буксового узла грузового вагона. Система автономного питания также предполагает работу с накопителем энергии в виде аккумуляторов или ионисторов, а также контроль выходного напряжения для обеспечения стабильной работы потребителей. Существующие на сегодняшний момент прототипы генераторов из Германии не учитывают конструктивные особенности буксовых узлов для российских железных дорог и грузовых вагонов. Однако существенные колебания валютных курсов на данный момент также являются серьезным препятствием для их использования в России.

#### Конструкция магнитной системы генераторов.

Для более эффективного использования пространства буксового узла предлагается применить обратимую конструкцию магнитной системы генератора, т.е. с установкой якоря внутрь ротора [9–11]. Размер пространства буксового узла предполагает установку генератора с внешним диаметром ротора — не более 100 мм, и толщиной магнитопровода не более 15 мм.

Предварительные расчеты магнитной системы показывают целесообразность использования шестиконечной звезды в качестве явнополюсного сердечника якоря (статора). В качестве материала магнитопровода применялись листы электротехнической стали 3414. Кривая намагничивания стали магнитопровода показана на рис. 1.

Ротор — вращающаяся часть генератора, приводится в движение шейкой вала колесной пары. Магнитопровод ротора выполнен также шихтованным из стали марки 3414. В пазы магнитопровода, с чередованием направления намагниченности, установлены неодимовые магниты в форме кубов, со стороной 10 мм.

Геометрические характеристики магнитной системы буксового генератора представлены на рис. 2. Из данных рис. 2 видно, что количество полюсов — 18, при числе обмоток — 6, что приводит к недоиспользованию части магнитов при работе.

**Результаты экспериментов.** Расчет магнитного поля необходим для определения магнитной индукции, напряженности магнитного поля, а также индуктивности и электромагнитных сил и моментов.

Для построения картины магнитного поля воспользуемся аппаратом конечно-элементного анали-

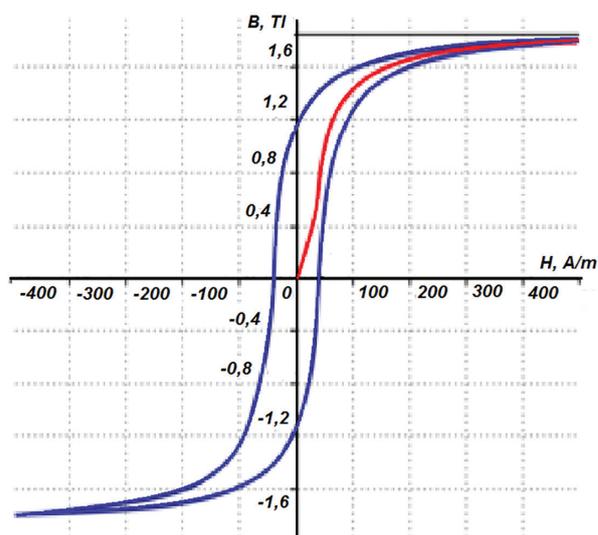


Рис. 1. Кривая намагничивания стали 3414

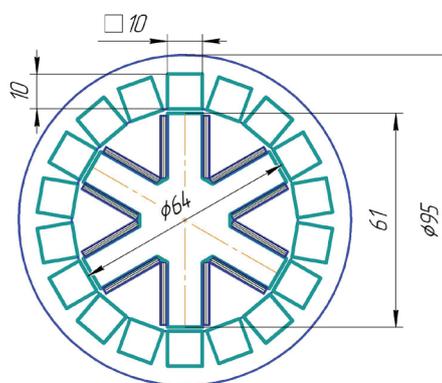


Рис. 2. Геометрические размеры магнитной системы генератора (10×10×10),  $Z_p=9$

за, с расчетом и представлением результатов в программном комплексе ElCut.

Цель метода конечных элементов состоит в решении обыкновенных дифференциальных уравнений внутри заданной области. При решении дифференциальных уравнений производят разбиение непрерывной области расчета сеткой в набор дискретных элементов или поддоменов. Далее внутри каждого элемента, обычно произвольным образом, выбирается вид аппроксимирующей функции. Часто это может быть полином первой, второй или третьей степени. За пределами поддомена аппроксимирующая функция равна нулю. На границах поддоменов значения полиномов неизвестны, эти значения являются решением задачи и определяются из условия равенства аппроксимирующих функций на границе (в узлах) между соседними поддоменами (элементами). Коэффициенты аппроксимирующих полиномов находятся через граничные значения в узлах поддоменов. Далее из уравнений, содержащих условия равенства функций в узлах, составляется общая система линейных алгебраических уравнений. Решение данной системы уравнений и является решением дифференциального уравнения в заданной области. При этом количество узлов элементов пропорционально количеству уравнений системы и может быть скорректировано как в сторону увеличения, так

и в сторону уменьшения. При этом сетка расчета будет иметь либо разреженный, либо уплотненный вид. Более плотная сетка по всей области решения, как правило, нецелесообразна так как резко увеличивается число уравнений системы, а следовательно, требования к аппаратной части ЭВМ и времени расчета. При сильно разреженной сетке можно получить неудовлетворительные результаты расчета, с точки зрения точности. Часто при разбиении области решения размер элементов варьируют, увеличивая его на периферии интересующей зоны и уменьшая его вблизи наиболее нужных участков. В данной задаче такими участками являются воздушный зазор между якорем и индуктором. В рассматриваемой задаче область решения разбивалась на сетку с количеством узлов — 20300.

В качестве типа задачи рассматривалась задача магнитостатики. Под задачей магнитостатики будем понимать реализацию постоянства токов и магнитного поля во времени, что допустимо принимать в случае синхронных машин с постоянными магнитами, для которой справедливо выполнение закона Био — Савара — Лапласа (1).

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I[\vec{r} \times d\vec{r}]}{r^3}. \quad (1)$$

В качестве допущения примем изотропную среду применяемых материалов с точки зрения магнитных свойств (2).

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}. \quad (2)$$

Область решения ограничим окружностью с диаметром 140 мм и зададим значение магнитного потенциала на данной окружности равным нулю ( $A_0 = 0$  Вб/м).

Для статора и ротора магнитную проницаемость среды зададим согласно кривой намагниченности, приведенной на рис. 1. Магнитную проницаемость магнитов, обмоток и воздушных зазоров примем равной единице  $\mu = 1$ .

Обмотка статора состоит из шести катушек, каждая из которых состоит из 300 витков ( $N=300$ ) медного провода, с током  $I=0,326$  А, что определяет реакцию якоря.

Для проверки правильности чередования направлений векторов намагниченности постоянных магнитов строят картину векторов магнитной индукции, изображенную на рис. 3. Так как нет неравномерностей в распределении силовых линий магнитной индукции, то параметры постоянных магнитов заданы верно.

Зададимся коэрцитивной силой неодимовых магнитов  $H = 800$  кА/мм<sup>2</sup>, тогда карта поля магнитной системы генератора будет выглядеть, как показано на рис. 4. Наиболее насыщенные участки магнитопровода расположены на внутренней стороне расточки ротора в местах примыкания к пазам.

На рис. 5 приведены распределения магнитной индукции вдоль зазора (абсолютное значение ( $B$ ) и нормальная составляющая  $B_n$ ), направление обхода контура показано на рис. 6.

Для расчета ЭДС генератора, как правило, используются усредненные значения магнитной индукции вдоль полюсов статора. Распределение магнитной индукции вдоль полюса статора представлено на рис. 7.

Используя распределение магнитной индукции, с помощью формулы (3), задаваясь общим сопро-

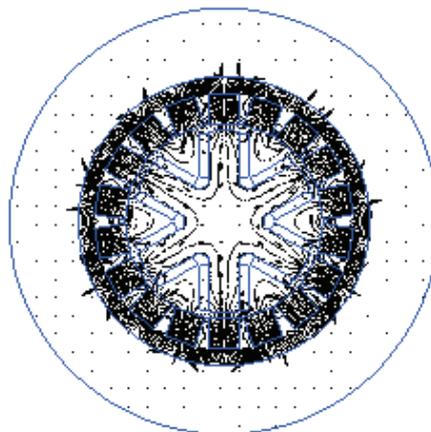


Рис. 3. Картина поля векторов магнитной индукции

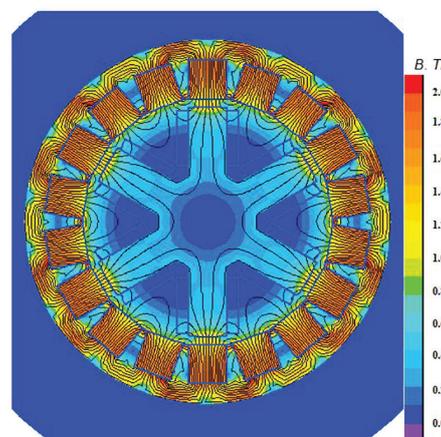


Рис. 4. Карта магнитного поля генератора ( $H = 1500$  кА/мм<sup>2</sup>)

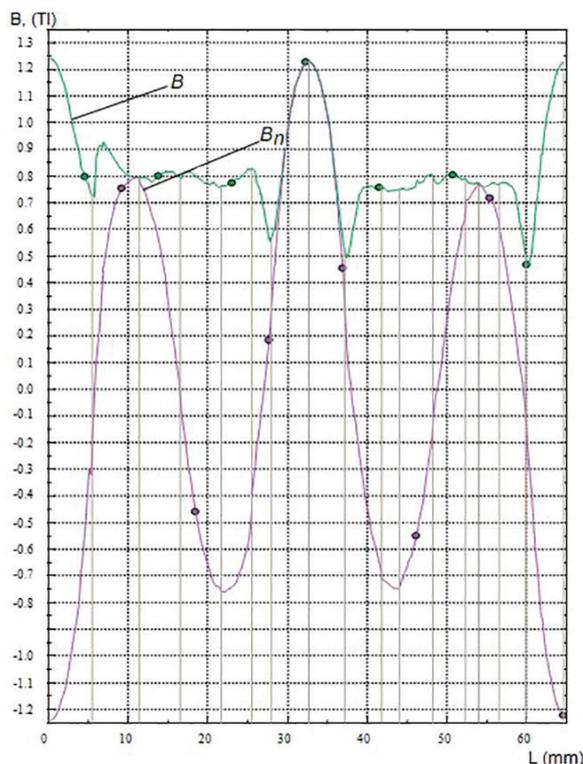


Рис. 5. Распределение магнитной индукции (абсолютное значение ( $B$ , Tl) и нормальная составляющая ( $B_n$ , Tl)

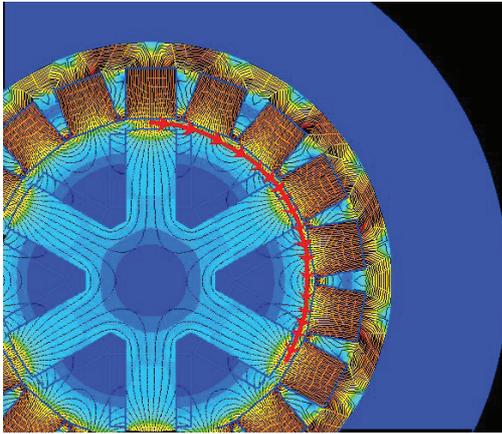


Рис. 6. Направление контура

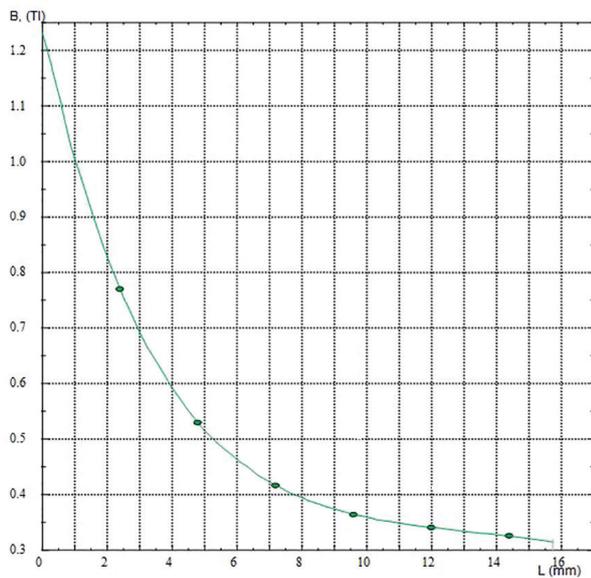


Рис. 7. Распределение магнитной индукции вдоль полюса

тивлением нагрузки и обмотки  $R$ , можно определить электрическую мощность генератора.

$$P_E = \frac{(Z_K Z_p \omega B_{\max} S N)^2}{2R}, \quad (3)$$

где  $B_{\max}$  — усредненное максимальное значение индукции в магнитопроводе статора (Тл);  $\omega = 15,75$  рад/с — угловая скорость вращения ротора (при усредненной скорости движения состава — 40 км/ч);  $S = 0,0001$  м<sup>2</sup> — площадь поперечного сечения магнитопровода полюса;  $Z_p = 9$  — число пар полюсов;  $Z_K = 6$  — число катушек.

Расчетное значение ЭДС генератора составляет 9,12 В ( $E_E = 9,12$  В).

Кроме расчетного значения мощности и ЭДС по приведенной методике можно выполнить расчет индуктивности, согласно формуле (4):

$$L_w = \frac{B_{\max} S}{IN}, \quad (4)$$

где  $I$  — ток в катушке, А.

**Выводы.** Расчетная мощность генератора при активной нагрузке составляет 1,418 В, даже при

средней скорости вагона 40 км/ч. С увеличением скорости мощность также вырастет, однако во время длительных стоянок питание систем диагностики, навигации и телеметрии будет осуществляться за счет аккумуляторных батарей. При увеличении нагрузки и больших зарядных токах можно установить несколько буксовых генераторов на грузовой вагон, что также позволит решить вопрос резерва питания при отказе одного из генераторов.

#### Библиографический список

1. Ghazel M. Formalizing a subset of ERTMS/ETCS specifications for verification purposes // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2014. Vol. 42. P. 60–75. DOI: 10.1016/j.trc.2014.02.002.
  2. Crainica T., Gendreaub M., Potvin J. Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2009. Vol. 17, Issue 6. P. 541–557. DOI: 10.1016/j.trc.2008.07.002.
  3. Baldinia G., Fovino I. N., Masera M. An early warning system for detecting GSM-R wireless interference in the high-speed railway infrastructure // *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2010. Vol. 3, Issue (3–4). P. 140–156. DOI: 10.1016/j.ijcip.2010.10.003.
  4. Giannopoulos G. A. The application of information and communication technologies in transport // *European Journal of Operational Research*. 2004. Vol. 152, Issue 2. P. 302–320. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00026-2.
  5. Matthews P., Slinn M., Guest P. *Traffic Engineering Design: Principles & Practice*. Butterworth-Heinemann, 1998. P. 209–2017.
  6. Каргин В. Г., Науменко С. Н., Буров В. В. [и др.]. Разработка генераторно-приводной установки для трехэлементных грузовых тележек фитинговых платформ // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2014. № 5. С. 44–49.
  7. Науменко С. Н., Теймуразов Н. С., Просеков А. В. Система автономного электроснабжения железнодорожных грузовых фитинговых платформ от оси колесной пары // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2012. № 3. С. 17–19.
  8. Петрушин А. Д., Ворон О. А., Смачный Ю. П. Вентильно-индукторные машины для железнодорожного состава // *Вестник ВЭЛНИИ*. 2005. Вып. 1 (48). С. 147–159.
  9. Пат. 2006146775 Российская Федерация, МПК В 61 К 9/04 Способ мониторинга состояния букс движущегося / М. В. Руфицкий, Д. В. Реутов. № 2006146775/11; заявл. 26.12.06; опубл. 10.07.08. Бюл. № 19.
  10. Пат. RU82953U1 Российская Федерация, МПК Н 02 К 21/24 Магнитоэлектрический генератор грузового железнодорожного вагона с экранирующим индуктором / В. М. Круглов, М. В. Руфицкий, М. А. Сучков. № 2008142711/22; заявл. 28.10.08; опубл. 10.05.09.
  11. Tatevosyan A. A., Tatevosyan A. S. Calculation of magnetic system of the magnetoelectric machines // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2014 – Proceedings*. 7005698. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005698.
- ЛЫСЕНКО Олег Александрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).  
 SPIN-код: 4975-9193  
 AuthorID (РИНЦ): 643928  
 ORCID: 0000-0002-7924-5494  
 AuthorID (SCOPUS): 5650338820

ReseearcherID: N-5528-2015

Адрес для переписки: deolas@mail.ru

**ФЕДОРОВА Людмила Дмитриевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ.

SPIN-код: 9669-6509

AuthorID (РИНЦ): 90879

Адрес для переписки: fedorova@bk.ru

**ШАНТАРЕНКО Сергей Георгиевич**, доктор технических наук, доцент (Россия), проректор по научной работе, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения.

AuthorID (РИНЦ): 477507

AuthorID (SCOPUS): 57200089403

ReseearcherID: B-1719-2015

#### Для цитирования

Лысенко О. А., Федорова Л. Д., Шантаренко С. Г. Исследование и расчет магнитной системы встроенных буксовых генераторов грузовых вагонов // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 52–56. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-52-56.

Статья поступила в редакцию 02.11.2020 г.

© О. А. Лысенко, Л. Д. Федорова, С. Г. Шантаренко