

РЕШЕТЧАТАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОДЪЕМНО- ТРАНСПОРТНЫХ УСТРОЙСТВ ГОРНОРУДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. В. Бланк

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

Аннотация: В горной промышленности широко используются двигатели постоянного тока, поэтому большое значение придается задачам, связанным с исследованием и моделированием электромагнитного поля в их рабочем объеме. Для моделирования электромагнитного поля чаще всего применяются компьютерные программы, основанные на численных алгоритмах решения полевых уравнений. Но вместе с тем не теряют актуальности аналитические методы, которые можно считать разновидностью численных методов, поскольку их практическая реализация затруднена или вовсе невозможна без использования компьютеров. Именно к такого рода методам расчета и моделирования электромагнитных полей относятся решетчатые схемы замещения. Решетчатая схема замещения создается на основе фундаментальных законов теории электромагнитного поля (закона полного тока и закона электромагнитной индукции) и представляет собой разветвленную электрическую цепь из активных и реактивных элементов, аналогом напряжения в которой служат составляющие векторного магнитного потенциала, а аналогом тока – составляющие вектора напряженности магнитного поля. Настоящая статья посвящена синтезу решетчатой схемы замещения двигателя постоянного тока, входящего в состав привода подъемно-транспортного устройства горнорудного оборудования. Статор двигателя явнополюсный, ротор неявнополюсный. Магнитная проницаемость полюсов статора и зубцов ротора постоянна. Токи в обмотке возбуждения и в пазах ротора заданы в исходных данных задачи. Расчет поля осуществляется на двойном полюсном делении двигателя для некоторого фиксированного момента времени. Тестовые расчеты свидетельствуют о довольно высокой точности решетчатой схемы замещения двигателя постоянного тока.

Ключевые слова: Горнорудное электрооборудование, подъемно-транспортные устройства, двигатели постоянного тока, решетчатые схемы замещения, электромагнитное поле, закон полного тока, закон электромагнитной индукции, теория электрических цепей.

Для цитирования: Бланк А. В. Решетчатая схема замещения двигателя постоянного тока подъемно-транспортных устройств горнорудного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 52–63. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_52.

The lattice equivalent circuit of the DC motor in mine lift-and-carry transfer mechanisms

A. V. Blanc

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract: In the mining industry, DC motors are widely used, so analyzing and simulating the electromagnetic fields are of great importance. The numerical-based computer programs solving the field equations are most often used for simulating the electromagnetic fields. At the same time, such analytical methods are still in demand, which can be considered as a kind of numerical methods, since in practice they are difficult or completely impossible without computers. The lattice equivalent circuits are these methods for calculating and modeling the electromagnetic fields. The lattice equivalent circuit is based on the fundamental laws of the electromagnetic theory (Ampere's circuital law and Faraday's law of electromagnetic induction). It is the complicated electric circuit with active and reactive elements, in which the vector magnetic potential components are the analogues of the voltages and the vector components of the magnetic field intensity are the analogues of the currents. This paper tells about the lattice equivalent circuit of the DC motor, which is part of the drive of the lift-and-carry transfer mechanism for the mine electric equipment. In the DC motor, the stator is salient-pole and the rotor is cylindrical. The stator poles and rotor teeth have the constant magnetic permeability. The exciting current and the currents of the rotor slots are the initial data of the problem. The electromagnetic field is modeled within the double pole pitch for a certain fixed point of time. Test calculations indicate a rather high accuracy of the lattice equivalent circuit of the DC motor.

Key words: Mine electric equipment, Lift-and-carry transfer mechanisms, DC motors, Lattice equivalent circuits, Electromagnetic field, Ampere's circuital law, Faraday's law of electromagnetic induction, Circuit theory

For citation: Blanc A. V. The lattice equivalent circuit of the DC motor in mine lift-and-carry transfer mechanisms. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):52–63. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_52.

1. Введение

При создании и совершенствовании электротехнических устройств, входящих в состав горнорудного оборудования (в частности — электрических машин), большое значение придается расчету и моделированию электромагнитного поля этих устройств. В настоящее время для моделирования электромагнитного поля чаще всего применяются компьютерные программы, основанные на численных алгоритмах решения полевых уравнений. Но вместе с тем не теряют актуальности расчетные методы, которые, с одной стороны, принято относить к аналитическим, а с другой стороны, можно считать разновидностью численных методов, поскольку их практическая реализация затруднена или вовсе невозможна без использования компьютерного моделирования. Именно к такого рода методам расчета

и моделирования электромагнитного поля относятся решетчатые схемы замещения электрических машин, разработанные в Новосибирском государственном техническом университете профессором А. И. Инкиным и автором настоящей статьи.

Решетчатая схема замещения представляет собой разветвленную электрическую цепь из активных и реактивных элементов, с помощью которой моделируется двумерное электромагнитное поле электрической машины. Решетчатую схему целесообразно создавать и рассчитывать с помощью компьютерных программ для моделирования электрических цепей (например, с помощью программы *Multisim*).

Решетчатые схемы замещения, сочетающие в себе методы теории электромагнитного поля и методы теории электрических цепей, можно весьма эффективно использовать при исследовании

довании электрических двигателей и генераторов, входящих в состав горнорудного оборудования.

Использованию электрических машин в горной промышленности посвящается множество научных публикаций (как в нашей стране, так и за рубежом). Среди исследуемых машин — асинхронные двигатели [1–3] (в том числе — асинхронные двигатели, управляемые тиристорными преобразователями [4–6]), синхронные двигатели и генераторы [7–9] (в том числе — синхронные двигатели с постоянными магнитами [8–12]), линейные двигатели различных конструкций [13–15] и, наконец, двигатели постоянного тока [16–18]. Хотя в последние годы сохраняется тенденция заменять двигатели постоянного тока машинами переменного тока с питанием от тиристорных преобразователей, двигатели постоянного тока и в настоящее время широко применяются в горной промышленности (в приводе шахтных электровозов, экскаваторов, электровозной откатки карьеров) из-за очевидных достоинств — способности развивать большой момент в пусковых и рабочих режимах и возможности изменять скорость в очень широких пределах с сохранением точности управления. Поэтому по-прежнему актуальными остаются задачи, связанные с исследованием и моделированием электромагнитного поля в рабочем объеме двигателей постоянного тока.

Следует заметить, что по сравнению с бесконтактными электрическими машинами (асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором, синхронными двигателями и генераторами с возбуждением от постоянных магнитов), в двигателях постоянного тока из-за наличия коллектора гораздо сложнее обеспечить взрывозащищенность. Несмотря на это, дви-

гатели постоянного тока производятся и во взрывозащищенном исполнении (например, ДПЗ 55/34–4КУХЛ2, ДПЗ 99/85–6К2) и используются в приводе главных механизмов буровых установок, подъемных лебедок и т. п. Двигатели серии Д (Д 12, Д 21, Д 31, Д 41, Д 806) применяются в электроприводе подъемно-транспортных устройств горнорудного оборудования в условиях повышенной влажности, температуры, запыленности и вибраций.

Именно двигатель серии Д (двигатель Д 12 мощностью 2,5 кВт) выбран в качестве прототипа при создании решетчатой схемы замещения, представленной в настоящей статье. Эту статью можно считать логическим продолжением статьи [19], посвященной решетчатой схеме замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. В [19] изложена история каскадных и решетчатых схем замещения, поэтапно описан процесс синтеза *A-H*-ячейки прямоугольного поперечного сечения на основе фундаментальных законов теории электромагнетизма — закона полного тока и закона электромагнитной индукции. Поэтому в настоящей статье эти вопросы подробно не рассматриваются.

Поскольку двигатель постоянного тока — это явнополюсная электрическая машина (в отличие от неявнополюсного асинхронного двигателя), решетчатая схема замещения двигателя постоянного тока сложнее решетчатой схемы замещения асинхронного двигателя. Наличие полюсов, полюсных наконечников и немагнитных промежутков между полюсами приводит к гораздо большему количеству ячеек самой разнообразной формы, несмотря на то обстоятельство, что решетчатая схема замещения (а также численная модель для тестовых расчетов) упрощена по сравнению с дви-

гателем-прототипом Д 12. Например, и в решетчатой схеме замещения, и в численной модели отсутствуют добавочные полюса, компенсирующие искажение результирующего поля, вызванное поперечной реакцией якоря и уменьшающие, таким образом, искрение коллектора. Поскольку при разработке данной решетчатой схемы замещения особое внимание уделено действию поперечной реакции якоря, добавочные полюса в рассматриваемой решетчатой схеме замещения и в численной модели отсутствуют. Безусловно, в дальнейшем (при необходимости) можно будет создать также решетчатую схему замещения двигателя постоянного тока с добавочными полюсами.

Итак, приступая к созданию численной модели и решетчатой схемы замещения двигателя постоянного тока, полагаем, что поле в объеме двигателя плоскопараллельное, полюса статора и зубцы ротора, магнитная проницаемость которых постоянна и конечна, укреплены на поверхности идеального ферромагнетика, длина модели в направлении оси машины равна единице.

2. Методы моделирования. Численная модель и решетчатая схема замещения двигателя постоянного тока

Необходимая для тестовых расчетов численная модель создана на основе двигателя Д 12 и имеет следующие параметры: статор явнополюсный, ротор неявнополюсный; число пар полюсов статора 2; относительная магнитная проницаемость полюсов статора и зубцов ротора 500; диаметр ротора 160 мм; внутренний диаметр статора (по центру полюсного наконечника) 162 мм; высота полюса 48 мм; ширина полюса 42 мм; длина дуги полюсного наконечника 77 мм; число пазов

ротора 28; высота зубца ротора 25 мм; ширина зубца ротора 6 мм; ширина коронки зубца ротора 15,35 мм; рабочий зазор неравномерный и изменяется от 1,07 мм на оси симметрии полюса до 3,1 мм на краю полюсного наконечника; площадь поперечного сечения обмотки возбуждения 570,2 мм²; площадь поперечного сечения паза ротора 199,6 мм²; плотность тока в обмотке возбуждения 1,6 А/мм²; плотность тока в пазу ротора 0,7 А/мм².

В двигателе постоянного тока при вращении ротора обмотка ротора обтекается переменным током, но поля ротора и статора остаются неподвижными одно относительно другого, что позволяет решать задачу как полевою задачу постоянного тока для некоторого фиксированного момента времени. В силу симметрии поля расчет можно осуществить на двойном полюсном делении. Таким образом, численная модель приобретает вид, представленный на рис. 1. На рис. 1 обозначены токи в обмотке возбуждения и в пазах ротора (окружность с крестом внутри означает, что ток направлен перпендикулярно плоскости чертежа от наблюдателя, окружность с точкой внутри означает, что ток направлен к наблюдателю). Эти токи известны и при расчете задаются как токи сторонних источников.

При синтезе решетчатой схемы замещения двигателя геометрию расчетной области можно несколько упростить. Во-первых, расчетная практика показывает, что если произвольно изменять конфигурацию поперечного сечения обмотки возбуждения (сохраняя неизменным количество ампер-витков в обмотке), это не скажется на поле возбуждения. Поэтому в решетчатой схеме замещения обмотка возбуждения может иметь прямоугольное поперечное сечение. Во-вторых, зубцово-пазовую зону

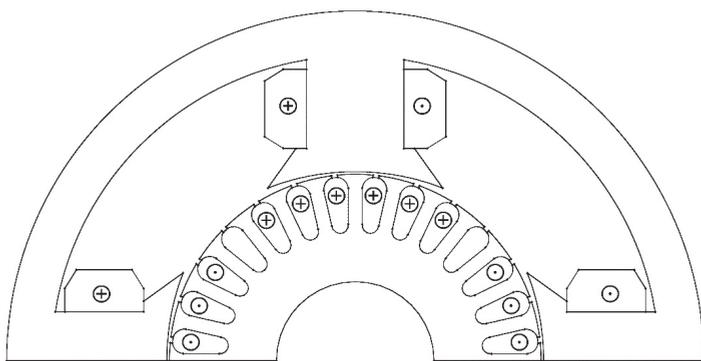


Рис. 1. Численная модель (на двойном полюсном делении)

Fig. 1. The numerical model (the double pole pitch)

ротора можно заменить сплошной анизотропной средой с усредненными составляющими магнитной проницаемости, как это сделано в [19]. При этом предполагается, что паз овального поперечного сечения заменяется эквивалентным расчетным пазом клиновидного сечения той же площади. Как будет показано далее при тестовых расчетах решетчатой схемы, такое упрощение практически не повлияет на точность моделирования ни на качественном, ни на количественном уровне. Тогда решетчатая схема замещения будет иметь 232 ячейки во всей расчетной области (в силу симметрии сетки ячеек на рис. 2 она изображена не на двойном полюсном делении, а на половине полюсного деления). Ярма статора и ротора в решетчатой схеме замещения отсутствуют, потому что представляют собой идеальный ферромагнетик, на поверхности которого равны нулю касательные составляющие вектора напряженности магнитного поля.

Ячейки в решетчатой схеме различаются по форме — прямоугольник, треугольник, трапеция и сегмент круга, который в дальнейшем будем именовать цилиндрической ячейкой. В схемах замещения А-Н-ячеек, изображенных на рис. 3, аналогом напряжения служит векторный магнитный потен-

циал, умноженный на длину ячейки в направлении оси двигателя (A_1l , A_2l , A_3l , A_4l), а аналогом тока — касательная составляющая вектора напряженности магнитного поля, умноженная на размер ячейки в направлении этой составляющей. Схемы замещения прямоугольных, цилиндрических и треугольных А-Н-ячеек подробно описаны в [20]. Ячейку-трапецию при расчете данной решетчатой схемы можно заменить прямоугольной ячейкой, ширина которой равна средней линии трапеции.

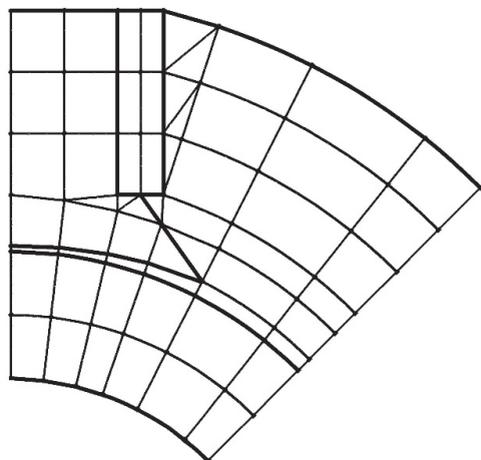
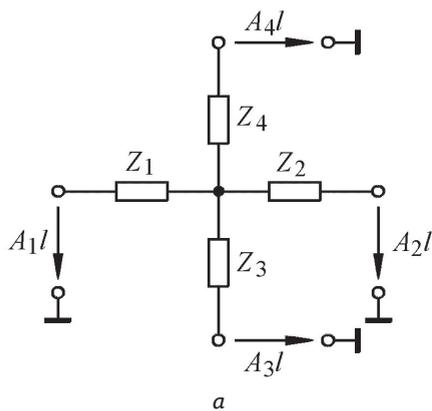
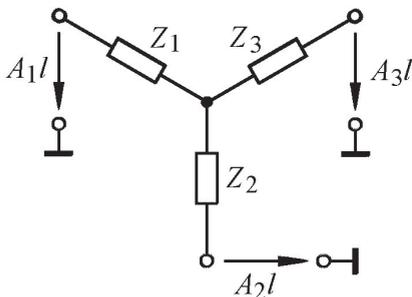


Рис. 2. Сетка ячеек в решетчатой схеме замещения (на половине полюсного деления)

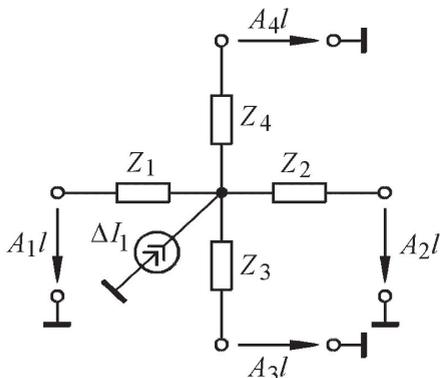
Fig. 2. The mesh of cells in the lattice equivalent circuit (half the pole pitch)



a



б



в

Рис. 3. Схемы замещения А-Н-ячеек: прямоугольная и цилиндрическая ячейка (а); треугольная ячейка (б); ячейка со сторонним источником тока (в)

Fig. 3. The equivalent circuits of the A-H-cells: the rectangle and cylindrical cell (a); the triangular cell (б); the cell with the external current source (в)

Сопротивления Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 в схеме замещения прямоугольной ячейки (см. рис. 3, а) определяются как

$$Z_1 = Z_2 = \mu l \frac{\Delta x}{2\Delta y}, \quad (1)$$

$$Z_3 = Z_4 = \mu l \frac{\Delta y}{2\Delta x}, \quad (2)$$

где μ — абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м; l — длина ячейки в направлении оси двигателя, м; $\Delta x, \Delta y$ — размеры ячейки в горизонтальном и вертикальном направлении м.

В прямоугольных ячейках, моделирующих обмотку возбуждения, имеется сторонний источник тока (см. рис. 3, в):

$$\Delta I_1 = \frac{\delta_1 S_1}{6\Delta x \Delta y} \Delta x \Delta y, \quad (3)$$

где ΔI_1 — ток, пронизывающий прямоугольную ячейку, А; δ_1 — плотность тока в обмотке возбуждения, А/м²; S_1 — площадь поперечного сечения обмотки возбуждения, м².

Схема замещения цилиндрической ячейки без стороннего источника тока также соответствует рис. 3, а, но сопротивления Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 определяются иначе:

$$Z_1 = Z_2 = \mu l \frac{r_0 \Delta \alpha}{2\Delta r}, \quad (4)$$

$$Z_3 = \mu l \frac{\Delta r}{2r_1 \Delta \alpha}, \quad (5)$$

$$Z_4 = \mu l \frac{\Delta r}{2r_2 \Delta \alpha}, \quad (6)$$

где r_1, r_2, r_0 — меньший, больший и средний радиус ячейки, м; Δr — размер ячейки в радиальном направлении м; $\Delta \alpha$ — размер ячейки в угловом направлении, рад.

Сопротивления Z_1, Z_2, Z_3 в схеме замещения треугольной ячейки (см. рис. 3, б) определяются как

$$Z_1 = \mu l \frac{a_2 \sin \alpha_3}{4a_1} = \mu l \frac{a_3 \sin \alpha_2}{4a_1}, \quad (7)$$

$$Z_2 = \mu l \frac{a_3 \sin \alpha_1}{4a_2} = \mu l \frac{a_1 \sin \alpha_3}{4a_2}, \quad (8)$$

$$Z_3 = \mu l \frac{a_2 \sin \alpha_1}{4a_3} = \mu l \frac{a_1 \sin \alpha_2}{4a_3}, \quad (9)$$

где a_1, a_2, a_3 — стороны треугольника, соответствующие сопротивлениям Z_1, Z_2, Z_3 , м; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — углы, противолежащие этим сторонам, рад.

В зубцово-пазовой зоне ротора все ячейки цилиндрические, их схема замещения соответствует рис. 3, в (источник тока в этой схеме замещения будем далее обозначать ΔI_2), а параметры определяются выражениями:

$$Z_1 = Z_2 = \mu_r l \frac{r_0 \Delta \alpha}{2 \Delta r}, \quad (10)$$

$$Z_3 = \mu_\alpha l \frac{\Delta r}{2 r_1 \Delta \alpha}, \quad (11)$$

$$Z_4 = \mu_\alpha l \frac{\Delta r}{2 r_2 \Delta \alpha}, \quad (12)$$

$$\Delta I_2 = \delta_2 \frac{b}{t_z} r_0 \Delta r \Delta \alpha, \quad (13)$$

где ΔI_2 — ток, пронизывающий цилиндрическую ячейку, А; δ_2 — плотность тока в пазу ротора, А/м²; t_z, b — зубцовое деление и ширина эквивалентного клиновидного паза ротора (рассчитанные по диаметру ротора), м; μ_r, μ_α — абсолютная магнитная проницаемость среды в радиальном и угловом направлении, Гн/м;

$$\mu_r = \frac{\mu_{fe} (t_z - b) + \mu_0 b}{t_z}, \quad (14)$$

$$\mu_\alpha = \frac{\mu_0 \mu_{fe} t_z}{\mu_{fe} b + \mu_0 (t_z - b)}, \quad (15)$$

где μ_{fe} — абсолютная магнитная проницаемость зубца ротора, Гн/м; μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость воздуха, Гн/м.

Для учета влияния зубцов ротора на магнитное сопротивление рабочего зазора надо увеличить расчетный рабочий зазор, умножив его на коэффициент Картера:

$$k_8 = \frac{t_z + 10 \Delta}{b_z + 10 \Delta}, \quad (16)$$

где Δ — рабочий зазор, м; b_z — ширина коронки зубца ротора, м.

В данной модели рабочий зазор неравномерный, поэтому коэффициент Картера — величина непостоянная, и для каждой ячейки рабочего зазора вычисляется свое значение коэффициента Картера.

В силу условий непрерывности векторного магнитного потенциала и касательных составляющих вектора магнитной напряженности ячейки решетчатой схемы замещения соединяются между собой выводами. Представление об этом дает упрощенная решетчатая схема замещения на рис. 4, в которой все ячейки на двойном полюсном делении условно изображены прямоугольными.

Как и в решетчатой схеме замещения асинхронного двигателя, описанной в [19], выводы ячеек на левой вертикальной границе схемы замещения соединяются с выводами ячеек на правой вертикальной границе. Нижние выводы ячеек первого ряда (соответствующие нижней горизонтальной границе зубцово-пазовой зоны ротора) и верхние выводы ячеек третьего ряда (соответствующие верхней горизонтальной границе полюсов статора) остаются разомкнутыми.

3. Результаты расчетов

Численные тестовые расчеты производились в программе *Femm* 4.2, осно-

ванной на методе конечных элементов, решетчатая схема замещения двигателя постоянного тока была реализована в программе для моделирования электрических цепей *Multisim 10*.

Результаты расчетов представлены на рис. 5 и рис. 6, где обозначения на числовых осях имеют следующий смысл: B_n — нормальная (к поверхности ротора) составляющая вектора индукции магнитного поля на средней линии между ротором и полюсным наконечником статора, Тл; τ — полюсное деление, м; x — текущая координата, м.

Поскольку на кривой индукции, вычисленной численно, существенно проявляются зубцовые гармоники поля (см. рис. 5), в то время как решетчатая схема замещения не предназначена для моделирования зубцовых гармоник, сопоставлять результаты расчетов на рис. 5 возможно только на качественном уровне. Для количественной оценки необходимо сравнивать первые гармоники рассчитанных кривых (см. рис. 6). Они получены посредством численного разложения в ряд Фурье.

4. Обсуждение результатов

Кривые на рис. 5 демонстрируют хорошую корреляцию на качественном уровне между численным расчетом нормальной составляющей вектора магнитной индукции и расчетом по решетчатой схеме замещения. Форма рассчитанных кривых полностью согласуется с положениями теории электрических машин постоянного тока. В частности, острый пик на кривой, рассчитанной по решетчатой схеме замещения (как и пик на кривой, рассчитанной численно), обусловлен неравномерностью рабочего зазора.

О хорошей корреляции результатов на количественном уровне свидетельствуют кривые первых гармоник (см.

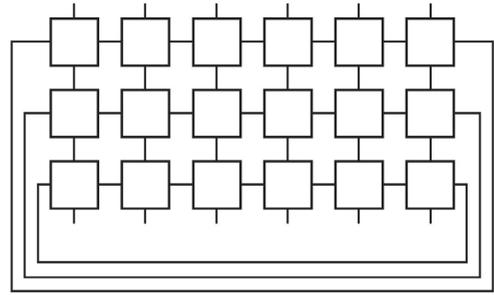


Рис. 4. Упрощенная решетчатая схема замещения двигателя постоянного тока
Fig. 4. The simplified lattice equivalent circuit of the DC motor

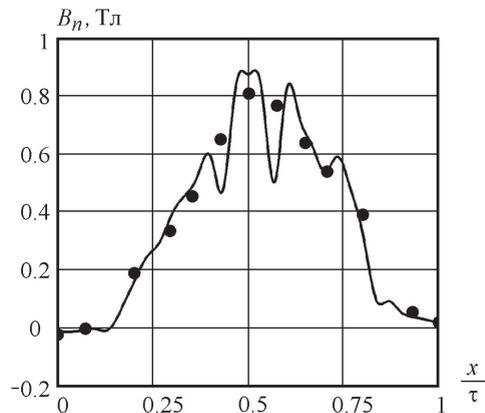


Рис. 5. Кривая нормальной составляющей вектора индукции магнитного поля в рабочем зазоре: сплошная линия соответствует численному расчету; точки соответствуют расчету по решетчатой схеме замещения
Fig. 5. The curve of the normal component of the magnetic induction vector in the air gap: the solid line corresponds to the numerical simulation; the points correspond to the lattice equivalent circuit

рис. 6), которые совпадают друг с другом в пределах 3 %.

Всё вышеизложенное позволяет сделать заключение не только о правильности расчетной модели (и отсутствии ошибок при ее реализации), но и о довольно высокой точности расчетов по решетчатой схеме замещения машины постоянного тока.

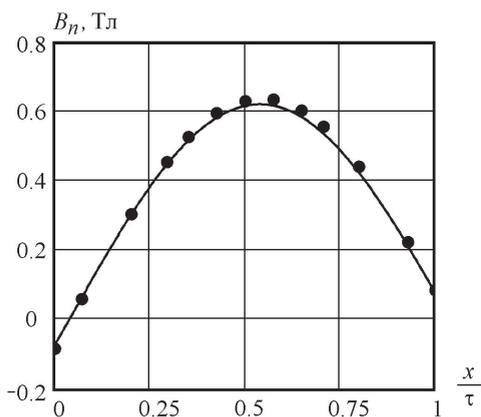


Рис. 6. Первая гармоника нормальной составляющей вектора индукции магнитного поля в рабочем зазоре: сплошная линия соответствует численному расчету; точки соответствуют расчету по решетчатой схеме замещения

Fig. 6. The first harmonic of the normal component of the magnetic induction vector in the air gap: the solid line corresponds to the numerical simulation; the points correspond to the lattice equivalent circuit

Можно утверждать, что применение в исследовательских задачах решетчатых схем замещения двигателей постоянного тока (как и решетчатых схем замещения других типов явнополюсных электрических машин) позволит улучшать технические характеристики электропривода, что приведет к более полному и рациональному использованию горного оборудования в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браславский И. Я., Костылев А. В., Хабаров А. И. Исследование экстремальной скалярной системы управления асинхронным электроприводом в условиях изменения параметров объекта // Известия вузов. Горный журнал. — 2014. — № 3. — С.86–90.
2. Беляев Е. Ф., Цылев П. Н., Щапова И. Н. Двухфазный многополюсный компенсированный асинхронный двигатель для нефтяной промышленности // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2017. — Т. 16. — № 3. — С.238–246. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.4.
3. Абрамов Б. И., Дацковский Л. Х., Кузьмин И. К., Шевырёв Ю. В. Электропривод вентиляторов шахтных установок // Электротехника. — 2017. — № 3. — С. 67–74.

5. Заключение

По результатам выполненной работы могут быть сделаны следующие выводы.

1. На основании положений теории электромагнитного поля (закона полного тока и закона электромагнитной индукции) синтезирована решетчатая схема замещения двигателя постоянного тока, используемого в составе привода подъемно-транспортных устройств горнорудного оборудования.

2. Для тестовых расчетов создана численная модель двигателя, основанная на методе конечных элементов. В отличие от численной модели, в решетчатой схеме замещения упрощена геометрия обмотки возбуждения, а зубцово-пазовая зона ротора (также для упрощения) представлена в виде сплошной анизотропной среды с усредненными значениями составляющих магнитной проницаемости.

3. Тестовые расчеты свидетельствуют не только о правильности теоретических положений, на основе которых синтезирована решетчатая схема замещения двигателя, но и о довольно высокой точности решетчатой схемы.

4. Применение в исследовательских задачах решетчатых схем замещения двигателей постоянного тока позволит улучшать технические характеристики электропривода, что приведет к более полному и рациональному использованию горного оборудования в целом.

4. Пичкур Е. В., Козлов В. В., Макарова Л. Н. Управление установкой электроцентробежных насосов с асинхронизированным вентильным двигателем двойного питания // Современные наукоемкие технологии. — 2016. — № 7. — С. 54–58.
5. Niedworok A., Lesiak K., Orzech L., Talarek M. Tests of electric properties of supply-control system of mining floor-loader // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021, 1134, 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/1134/1/012005.
6. Jablonski M., Borkowski P. Correction mechanism for balancing driving torques in an opencast mining stacker with an induction motor and converter drive system // Energies. 2022, 15, 1282. DOI: 10.3390/en15041282.
7. Крюков О. В. Энергоэффективность электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехнические системы и комплексы. — 2015. — № 1 (26). — С. 10–15.
8. Коржнев А. А., Войтюк И. Н., Смирнов А. И., Иванченко Д. И., Яковлева Э. В. Моделирование регулируемого синхронного электропривода насосного агрегата в системе поддержания пластового давления // Известия тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — № 5. — С. 505–513.
9. Виноградов А. Б., Гнездов Н. Е. Система возбуждения тягового генератора электромеханической трансмиссии карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн // Вестник ивановского государственного энергетического университета. — 2015. — № 1. — С. 36–41.
10. Семькина И. Ю., Тарнецкая А. В. Управление синхронным двигателем с постоянными магнитами безредукторного мотор-барабана ленточного конвейера // Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения: сборник трудов конференции. — Кемерово, 2017. — С. 408–1–408–7.
11. Бабокин Г. И. Электропривод питателя дробилок и мельниц на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами // Известия тульского государственного университета. Технические науки. — 2019. — № 11. — С. 97–102.
12. Huang Y., Yuan B., Xu S., Han T. Fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor of coal mine belt conveyor based on digital twin and ISSA-RF // Processes. 2022, 10, 1679. DOI: 10.3390/pr10091679.
13. Ключников А. Т., Коротаев А. Д., Шулаков Н. В., Шутемов С. В. Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель для погружного бесштангового насоса // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. — 2015. — № 1. — С. 158–162.
14. Шулаков Н. В., Шутемов С. В. Перспективы использования цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтесборных агрегатов // Фундаментальные исследования. — 2016. — № 12. — С. 795–799.
15. Wroblewski A., Krot P., Zimroz R., Mayer T., Peltola, J. Review of linear electric motor hammers — an energy-saving and eco-friendly solution in industry // Energies. 2023, 16, 959. DOI: 10.3390/en16020959.
16. Ананин В. Г., Муравлева Н. Н., Эмилов А. Б., Таалайбеков Ж. Т. Основные проблемы и методы совершенствования сетевого электропривода карьерного экскаватора ЭКГ-20 // Успехи современной науки. — 2016. — № 9. — Том 4. — С. 126–128.
17. Сорокин А. В. Послеремонтные испытания электрических машин шагающих экскаваторов // Науки о земле и недропользование. — 2020. — № 1 (70). — Том 43. — С. 103–110.
18. Radonjic M., Zecevic Z., Krstajic B. An IoT system for real-time monitoring of dc motor overload // Electronics. 2022, 11, 1555. DOI: 10.3390/electronics11101555.
19. Бланк А. В. Моделирование рудничного двигателя посредством решетчатой схемы замещения с синусоидальными источниками тока // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12–2. — С. 58–69. DOI: 10.25018/0236_14_93_2022_122_0_58.

20. Inkin A. I., Blanc A. V. The lattice equivalent circuits for 2D and 3D analysis of electromagnetic field in electrical devices. Novosibirsk, NSTU, 2020, 202 p. **MAE**

REFERENCES

1. Braslavskii I. Ia., Kostylev A. V., Khabarov A. I. Study of extreme scalar control system by the asynchronous electric drive when changing object parameters. *Izvestia vuzov. Gorny zhurnal*. 2014, no. 3, pp. 86 – 90. [in Russ].

2. Belyaev E. F., Tsylev P. N., Shchapova I. N. Biphas multi-pole compensated asynchronous motor for oil industry. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2017, vol. 16, no. 3, pp. 238–246. [in Russ]. DOI: 10.15593/2224–9923/2017.3.4.

3. Abramov B. I., Datskovsky L. H., Kuzmin I. K., Shevyrev Yu. V. Electric drive of ventilators of shaft installations . *Elektrotehnika*. 2017, no. 3., pp. 67 – 74. [in Russ].

4. Pichkur Ye. V., Kozlov V. V., Makarova L. N. Control with electric submersible pumps self-controlled inverter-bed asynchronous motor with double supply. *Modern High Technologies*. 2016, no. 7, – pp. 54 – 58. [in Russ].

5. Niedworok A., Lesiak K., Orzech L., Talarek M. Tests of electric properties of supply-control system of mining floor-loader. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021, 1134, 012005. DOI: 10.1088/1757–899X/1134/1/012005

6. Jablonski M., Borkowski P. Correction mechanism for balancing driving torques in an opencast mining stacker with an induction motor and converter drive system. *Energies*. 2022, 15, 1282. DOI: 10.3390/en15041282.

7. Krjukov O. V. Energy efficiency of electrically driven gas pumping units. *Elektrotehnichesie sistemy i komplekisy*. 2015, no. 1(26), pp. 10 – 15. [in Russ].

8. Korzhev A. A., Voytyuk I. N., Smirnov A. I., Ivanchenko D. I., Iakovleva E. V. Modeling of a regulated synchronous electric drive of a pump unit in a system of pressure support. *Izvestia tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. 2020, no. 5, pp. 505 – 513. [in Russ].

9. Vinogradov A. B., Gnezdov N. E. Traction alternator excitation system of the electromechanical transmission of a 240 ton load capacity dump truck. *Vestnik ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2015, no. 1. pp. 36 – 41. [in Russ].

10. Semykina I. Yu., Tarnetskaya A. V. Controlling the synchronous motor with permanent magnets of the reductorless motorized conveyor drum of the belt conveyor. *Ekologicheskie problemy promyshlennno razvityh i resursodobyvayushih regionov: puti reshenia: sbornik trudov konferencii*. Kemerovo, 2017, pp. 408–1 – 408–7. [in Russ].

11. Babokin G. I. Electric drive of feeders of crushers and mills on the basis of synchronous motor with permanent magnets. *Izvestia tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. 2019, no. 11. pp. 97 – 102. [in Russ].

12. Huang Y., Yuan B., Xu S., Han T. Fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor of coal mine belt conveyor based on digital twin and ISSA-RF. *Processes*. 2022, 10, 1679. DOI: 10.3390/pr10091679.

13. Klyuchnikov A. T., Korotaev A. D., Shulakov N. V., Shutemov S. V. Cylindrical linear ac electronic motor for operation pump. *Avtomatizatsia v elektroenergetike i elektrotehnike*. 2015, no. 1, pp. 158 – 162. [in Russ].

14. Shulakov N. V., Shutemov S. V. Prospects of cylindrical linear valve electric motor as a drive plunger oil production units. *Fundamental Research*. 2016, no. 12, pp. 795 – 799. [in Russ].

15. Wroblewski A., Krot P., Zimroz R., Mayer T., Peltola, J. Review of linear electric motor hammers – an energy-saving and eco-friendly solution in industry. *Energies*. 2023, 16, 959. DOI: 10.3390/en16020959.

16. Ananin V. G., Muravlyova N. N., Emilov A. B., Taalibekov Zh. T. The main problems and methods to improve the network of electric mining shovel EKG-20. *Uspehi sovremennoy nauki*. 2016, no. 9, vol. 4, pp. 126–128. [in Russ].

17. Sorokin A. V. Post-repair testing of the walking excavators' electrical machines. *Nauki o zemle i nedropolzovanie*. 2020, no. 1 (70), vol. 43, pp. 103–110. [in Russ].

18. Radonjic M., Zecevic Z., Krstajic B. An IoT system for real-time monitoring of dc motor overload. *Electronics*. 2022, 11, 1555. DOI: 10.3390/electronics11101555.

19. Blanc A. V. Modeling the mine motor by means of the lattice equivalent circuit with the sinusoidal current sources. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, 12–2, pp. 58–69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_58.

20. Inkin A. I., Blanc A. V. The lattice equivalent circuits for 2D and 3D analysis of electromagnetic field in electrical devices. Novosibirsk, NSTU, 2020, 202 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бланк Алексей Валерьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники, <https://orcid.org/0000-0003-0582-1257>, Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, Новосибирск, Проспект К. Маркса, д. 20, e-mail: alblances@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Blanc A. V., Cand. Sci (Eng.), the associate professor in the Department of the Theoretical Electrical Engineering, <https://orcid.org/0000-0003-0582-1257>, Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, 630073, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: alblances@yandex.ru.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 04.07.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 04.07.2023; accepted for printing 10.10.2023.

