

МОДЕЛИРОВАНИЕ РУДНИЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСРЕДСТВОМ РЕШЕТЧАТОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ С СИНУСОИДАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТОКА

А. В. Бланк

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: в горной промышленности широкое применение находят электрические машины (в том числе – и асинхронные двигатели), которые, как правило, работают в очень тяжелых условиях. В связи с этим особое значение имеет надежность и безопасность их эксплуатации. Процесс совершенствования электрических машин связан не только с увеличением их мощности, но и с обеспечением наиболее эффективного использования этой мощности. Совершенствование уже существующих и создание новых типов электрических машин требует всесторонних исследований электромагнитного поля в их активном объеме. В настоящее время чрезвычайно широко применяются численные методы расчета полей. Но остаются востребованными и аналитические методы. Особое место в аналитических исследованиях электромагнитного поля электрических машин занимают каскадные схемы замещения. Решетчатые схемы замещения электрических машин представляют собой новый этап развития каскадных схем замещения. Настоящая статья посвящена синтезу решетчатой схемы замещения асинхронного рудничного двигателя с короткозамкнутым ротором на базе плоской развертки в декартовой системе координат. Расчетная область характеризуется усредненными свойствами зубцово-пазовых зон статора и ротора. Источниками поля в решетчатой схеме замещения служат синусоидальные источники тока. Решетчатая схема замещения рудничного двигателя реализована в пакете схемотехнического моделирования Multisim 10. Сравнение результатов моделирования рудничного двигателя с численными расчетами свидетельствует о правильности разработанной расчетной модели.

Ключевые слова: рудничное электрооборудование, рудничные двигатели, рудничные асинхронные двигатели, каскадные схемы замещения, решетчатые схемы замещения, электромагнитное поле, закон полного тока, закон электромагнитной индукции, теория электрических цепей, теория четырехполюсников.

Для цитирования: 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_1493_2022_122_0_58.

Modeling the mine motor by means of the lattice equivalent circuit with the sinusoidal current sources

A. V. Blanc

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: In the mining industry, the induction motors are widely used. Moreover, they work in very difficult conditions. Therefore, their reliability and safety are of particular importance. Improving the electric machines is related not only with increasing their power, but also with the most efficient use of this power. Improving the existing electric machines and creating new machines require comprehensive researching the electromagnetic field in their functional volumes. Now, the numerical methods are extremely widely used for modeling electromagnetic fields. However, the analytical methods remain in demand too. In analytical researching the electromagnetic field of the electric machines, the cascade equivalent circuits take up the special place. The lattice equivalent circuit is the new grade of the cascade equivalent circuit. In the paper, the lattice equivalent circuit of the mine squirrel-cage induction motor is considered which is synthesized on the base of the Cartesian rectangular model. The model is characterized by property averaging in the zones of tooth and slots. In the lattice equivalent circuit, the sinusoidal current sources are field sources. The lattice equivalent circuit of the mine induction motor is created using Multisim 10. Comparing the lattice equivalent circuit with the numerical simulation indicates the correctness of modeling.

Key words: Mine electric equipment, Mine electric motors, Mine induction motors, Cascade equivalent circuits, Lattice equivalent circuits, Electromagnetic field, Ampere's circuital law, Faraday's law of electromagnetic induction, Circuit theory, Quadripole theory.

For citation: 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):58–69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_58.

1. Введение

В горнопромышленном оборудовании и в большом количестве горных машин (в конвейерах, шагающих экскаваторах, шахтных подъемниках и т.д.) часто используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, как в качестве основного, так и в качестве вспомогательного привода. Условия эксплуатации в шахтах, рудниках и карьерах, как правило, чрезвычайно тяжелые, и поэтому к конструкции двигателей предъявляются повышенные требования по надежности и безопасности. Часто асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором выпускаются во взрывозащищенном исполнении. Например, двигатели серий АИУМ 225 и dSKgwp применяются для привода скребковых и ленточных конвейеров в шахтах и в помещениях, где возможно присутствие метана и угольной пыли. Двигатели серии dSKgwp используются для привода исполнительных механизмов горных комбайнов. Двигатели серии ВАО7А (с алю-

миниевым ротором) — для привода насосов, вентиляторов, мешалок и т.д. Двигатели серии ВАО7М (с медным ротором) — для привода устройств с тяжелыми условиями пуска (углесосы, конвейеры и другие виды горношахтного оборудования). Двигатели серий ВР, ВРП и 2ВР — для привода машин и механизмов низкого напряжения в угольной промышленности. Мощности применяемых двигателей, в зависимости от выполняемой задачи, могут варьироваться в очень широких пределах — от 0,25 до 500 кВт.

Поскольку в горной промышленности асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором работают в очень тяжелых условиях, особое значение приобретает процесс их совершенствования, связанный не только с увеличением мощности, но и с обеспечением наиболее эффективного использования этой мощности. Совершенствование существующих и создание новых двигателей требует всесторонних исследований электромагнитного поля в объеме

двигателя. Как известно, в настоящее время чрезвычайно широко применяются численные методы расчета полей. Но остаются востребованными и аналитические методы и порожденные ими расчетные алгоритмы, особенно удобные в сочетании с современными компьютерными технологиями. Аналитические методы отличаются простотой и удобством при постановке задачи и реализации расчетов, а также могут служить для независимой проверки и обоснования новых численных моделей. И с этой точки зрения значение аналитических методов трудно переоценить. Применение таких методов позволит улучшить рабочие характеристики двигателей и тем самым расширить область их использования в горной технике.

Особое место при электромагнитных расчетах в электромеханике за рубежом [1, 2] и в России [3–5] занимают слоистые модели и созданные на их основе каскадные схемы замещения двигателей. В такой модели каждому расчетному слою ставится в соответствие определенная конструктивная зона двигателя (зубцы статора и ротора, рабочий воздушный зазор и т.д.). В каждом расчетном слое решается полевое уравнение, после чего полученные решения сшиваются на границах слоев на основе принципа непрерывности касательных составляющих векторов электрической и магнитной напряженности и нормальных составляющих вектора магнитной индукции. Эта операция представляет собой определение неизвестных постоянных интегрирования и, как правило, оказывается наиболее трудоемкой частью всего расчетного алгоритма.

С другой стороны, решения полевого уравнения в расчетных слоях модели можно привести к стандартным уравнениям четырехполюсника, извест-

ным в теории электрических цепей. Из системы уравнений четырехполюсника выводятся параметры схемы замещения (выражения для сопротивлений и источников), все четырехполюсники соединяются в каскадную схему, после чего осуществляется расчет этой схемы. Так как четырехполюсники соединены друг с другом выводами, условия непрерывности выполняются автоматически и отпадает необходимость в определении неизвестных постоянных интегрирования. Расчетный алгоритм значительно упрощается, а аналитическая модель, в определенном смысле, приобретает черты, присущие численным моделям.

В нашей стране каскадные схемы замещения асинхронных двигателей впервые были разработаны в 1970-е годы под руководством А. И. Инкина на кафедре теоретических основ электротехники Новосибирского электротехнического института (ныне Новосибирский государственный технический университет). На эту тему было опубликовано множество статей в научных журналах, но теоретические принципы этих работ наиболее полно изложены в [6, 7]. Из публикаций зарубежных [8–10] и отечественных [11, 12] авторов известны также каскадные схемы замещения для моделирования электромагнитных полей в электротермических установках.

По существу, каскадная схема замещения двигателя производит расчет двумерного электромагнитного поля в объеме двигателя посредством решения одномерной задачи на комплексной плоскости. Это одно из важных достоинств каскадной схемы. Но в определенных обстоятельствах решение одномерной полевой задачи становится недостатком каскадной схемы. Поэтому возникает необходимость в создании схем замещения двумерного электромагнитного поля.

В последние годы в работах как европейских ученых [13–15], так и, например, ученых из Азии [16, 17] под аббревиатурой РЕЕС известны схемы замещения, сводящие уравнения поля (дифференциальные уравнения в частных производных) к расчету некоторой эквивалентной электрической цепи. Профессором А. И. Инкиным и автором настоящей статьи был предложен совершенно иной подход к решению этой проблемы, основанный на законе полного тока в интегральной форме (который используется как аналог первого закона Кирхгофа) и законе электромагнитной индукции (который используется как аналог второго закона Кирхгофа) [18, 19]. По аналогии с каскадными схемами замещения А. И. Инкин назвал эти схемы замещения решетчатыми. Наиболее подробно решетчатые схемы замещения описаны в [20].

В этой статье представлена решетчатая схема замещения асинхронного рудничного двигателя с короткозамкнутым ротором, созданная на основе плоской развертки в декартовой системе координат. Применение плоской развертки оправдано в данном случае, поскольку ширина рабочего зазора двигателя значительно меньше радиуса статора и ротора и кривизна расчетной области не сказывается на распределении поля в зазоре. При этом плоская развертка значительно упрощает постановку задачи и реализацию расчетного алгоритма. Модель двигателя характеризуется усредненными свойствами зубцово-пазовых зон статора и ротора. Усреднение свойств осуществлено таким же способом, что и в каскадных схемах замещения, описанных в [6, 7]. Для того чтобы свойства электромагнитного поля проявились в модели наиболее отчетливо, магнитная проницаемость зубцов статора и ротора в тестовых расчетах выбрана сравни-

тельно небольшой. С этой же целью численный тестовый расчет проводился не в плоской развертке, а в цилиндрической модели без усреднения свойств.

В качестве объекта моделирования (двигателя-прототипа) выбран взрывозащищенный рудничный двигатель 2ВР-132S-4 мощностью 7,5 кВт. Полагаем далее, что обмотка статора однослойная (как в двигателе-прототипе). Считаем, что вихревые токи в обмотке статора и зубцах статора и ротора отсутствуют (это условие справедливо для всех асинхронных двигателей). Длина модели в направлении оси машины равна единице.

2. Методы моделирования. Решетчатая А–Н-схема замещения рудничного двигателя на основе анизотропной слоистой модели в декартовой системе координат

На рис. 1 представлена анизотропная слоистая модель асинхронного рудничного двигателя с короткозамкнутым ротором, основанная на усреднении свойств зубцово-пазовых зон статора и ротора. Слоистая модель создана на базе плоской развертки зубцово-пазовых зон статора и ротора в декартовой системе координат. Оси системы координат обозначены буквами x , y , z . Фазы обмотки статора обозначены буквами $A-X$, $B-Y$, $C-Z$. Высота зубцов статора равна h_1 , высота зубцов ротора равна h_2 , рабочий зазор равен Δ , полюсное деление равно τ . Составляющие магнитной проницаемости в зубцово-пазовых зонах статора и ротора в направлении осей координат равны μ_{x1} , μ_{y1} , μ_{x2} , μ_{y2} (индекс 1 соответствует параметрам статора, индекс 2 соответствует параметрам ротора). Проводимость зубцово-пазовой зоны ротора равна γ_2 . Магнитная проницаемость воздуха равна μ_0 . Зубцы статора и ротора расположены на поверхности

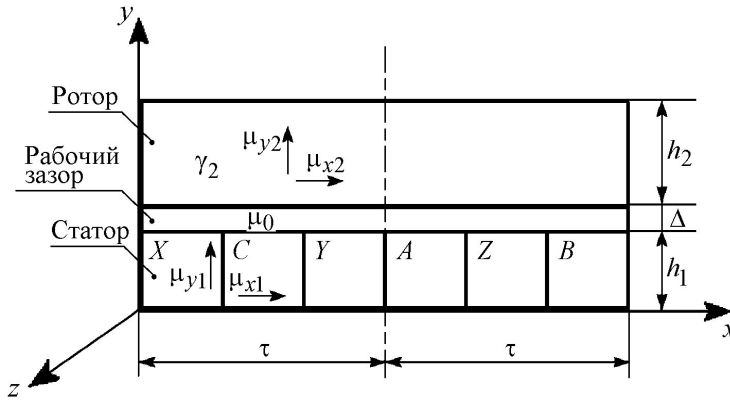


Рис. 1. Анизотропная слоистая модель асинхронного двигателя в декартовых координатах
 Fig. 1. The anisotropic laminated model of the induction motor in Cartesian coordinates

идеального ферромагнетика, магнитная проницаемость которого бесконечно велика, и поэтому касательная составляющая вектора магнитной напряженности обращается в нуль.

Составляющие магнитной проницаемости в зубцово-пазовых зонах статора и ротора получены на основе усреднения свойств:

$$\mu_x = \frac{\mu_0 \mu_{fe} t_z}{\mu_{fe} b + \mu_0 (t_z - b)}, \quad (1)$$

$$\mu_y = \frac{\mu_{fe} (t_z - b) + \mu_0 b}{t_z}, \quad (2)$$

где μ_{fe} — магнитная проницаемость зубца статора (ротора), Гн/м; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; t_z — зубцовое деление статора (ротора), м; b — ширина паза статора (ротора), м.

Проводимость зубцово-пазовой зоны ротора также получена посредством усреднения свойств:

$$\gamma_2 = \gamma_{Al} \frac{b_2}{t_{z2}}, \quad (3)$$

где γ_{Al} — проводимость стержней ротора, Ом⁻¹м⁻¹.

Решетчатая схема замещения двумерного электромагнитного поля

в активном объеме электрической машины представляет собой совокупность однотипных ячеек, где каждая ячейка — это многополюсник, моделирующий поле в малом элементе объема. На рис. 2 приведены схемы замещения А-Н-ячеек в области статора, ротора и рабочего воздушного зазора, в которых аналогом напряжения служат составляющие векторного магнитного потенциала (на рис. 2 обозначены как A_1, A_2, A_3, A_4), а аналогом тока — касательные составляющие вектора магнитной напряженности, умноженные на размер ячейки (на рис. 2 обозначены как $H_{1y}\Delta y, H_{2y}\Delta y, H_{3x}\Delta x, H_{4x}\Delta x$).

Схемы замещения А-Н-ячеек синтезированы на основе фундаментальных законов электромагнетизма. Рассмотрим процесс синтеза схемы замещения на примере А-Н-ячейки статора. На рис. 3 изображен малый элемент объема, обтекаемый синусоидальным током ΔI_1 . Размер ячейки в направлении оси ox равен Δx , размер ячейки в направлении оси oy равен Δy , размер ячейки в направлении оси oz равен l . На рис. 3 также обозначены составляющие векторного магнитного потенциала A_1, A_2, A_3, A_4 и касательные составляющие вектора магнитной напряженности $H_{1y}, H_{2y}, H_{3x}, H_{4x}$.

При малых размерах ячейки закон полного тока может быть представлен в виде уравнения

$$-\dot{H}_{1y}\Delta y + \dot{H}_{2y}\Delta y + \dot{H}_{3x}\Delta x - \dot{H}_{4x}\Delta x = \Delta \dot{I}_1. \quad (4)$$

Не вызывает сомнений, что уравнение (4) аналогично уравнению по первому закону Кирхгофа для цепи, изображенной на рис. 2, а. Сопротивления в этой цепи (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4) определим из соотношения между векторным потенциалом и магнитными потоками, пронизывающими ячейку в направлении осей ou и ox :

$$\dot{A}_1 l - \dot{A}_2 l = \Delta \dot{\Phi}_y, \quad (5)$$

$$\dot{A}_4 l - \dot{A}_3 l = \Delta \dot{\Phi}_x. \quad (6)$$

Если размеры ячейки достаточно малы, можно ввести допущение о том, что в объеме ячейки компоненты векторов поля в направлениях осей ou и ox изменяются по линейному закону. Тогда магнитные потоки определяются как

$$\Delta \dot{\Phi}_y = \mu_y l \Delta x \frac{\dot{H}_{1y} + \dot{H}_{2y}}{2}, \quad (7)$$

$$\Delta \dot{\Phi}_x = \mu_x l \Delta y \frac{\dot{H}_{3x} + \dot{H}_{4x}}{2}. \quad (8)$$

Если принять во внимание единичную длину модели, преобразовав выражения (5) – (8), получим уравнения по второму закону Кирхгофа для схемы замещения А-Н-ячейки статора (см. рис. 2, а):

$$\dot{A}_1 - \dot{A}_2 = \dot{H}_{1y}\Delta y \frac{\mu_y \Delta x}{2\Delta y} + \dot{H}_{2y}\Delta y \frac{\mu_y \Delta x}{2\Delta y}, \quad (9)$$

$$\dot{A}_4 - \dot{A}_3 = \dot{H}_{3x}\Delta x \frac{\mu_x \Delta y}{2\Delta x} + \dot{H}_{4x}\Delta x \frac{\mu_x \Delta y}{2\Delta x}. \quad (10)$$

Из уравнений (9) и (10) очевидны выражения для сопротивлений в схеме

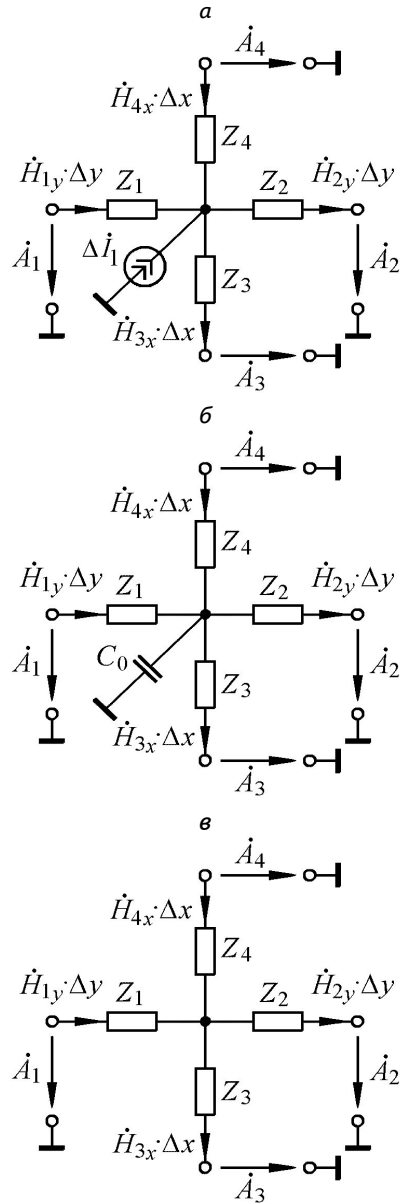


Рис. 2. Схемы замещения А-Н-ячеек статора (а), ротора (б) и рабочего зазора (в)

Fig. 2. The equivalent circuits of the А-Н-cells: the stator (а), the rotor (б) and the air gap (в)

замещения А-Н-ячейки статора. Аналогично выводятся выражения для сопротивлений в схемах замещения А-Н-ячеек ротора и рабочего зазора.

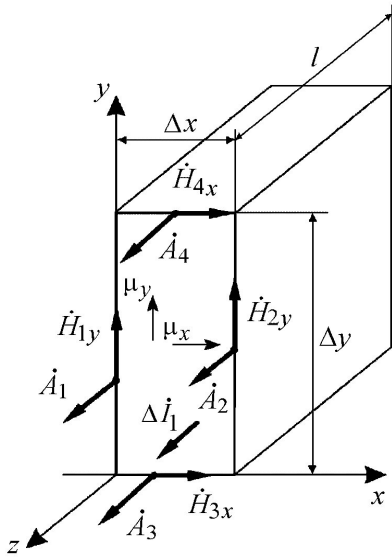


Рис. 3. Малый элемент объема в синусоидальном электромагнитном поле
Fig. 3. The small volume element in the sinusoidal electromagnetic field

Таким образом, сопротивления в схемах замещения A - H -ячеек статора и ротора (см. рис. 2, а, б) определяются выражениями

$$Z_1 = Z_2 = \frac{\mu_y \Delta x}{2 \Delta y}, \quad (11)$$

$$Z_3 = Z_4 = \frac{\mu_x \Delta y}{2 \Delta x}. \quad (12)$$

Сопротивления в схеме замещения A - H -ячейки рабочего зазора (см. рис. 2, в) также определяются выражениями (11) и (12), но при $\mu_x = \mu_y = \mu_0$.

Комплексный источник синусоидального тока $\Delta \dot{I}_1$ в схеме замещения A - H -ячейки статора (см. рис. 2, а) — это полный ток, пронизывающий ячейку. С учетом усреднения свойств

$$\Delta \dot{I}_1 = \delta_1 \frac{b_1}{t_{z1}} \Delta x \Delta y, \quad (13)$$

где δ_1 — комплексная плотность тока в данном пазу статора, A/m^2 .

Конденсатор в схеме замещения A - H -ячейки ротора (см. рис. 2, б) моделирует индуцированный вихревой ток в стержнях ротора и определяется как свойствами ячейки, так и скоростью движения бегущей волны поля (этой скорости соответствует скольжение). При единичной длине модели

$$C_0 = s \gamma_2 \Delta x \Delta y, \quad (14)$$

где s — скольжение.

На рис. 4 приведена упрощенная решетчатая A - H -схема замещения асинхронного двигателя, состоящая из 18 ячеек-многополюсников, расположенных в 3 ряда. Нижний ряд ячеек соответствует области статора, средний — области рабочего зазора, верхний — области ротора.

Все ячейки решетчатой A - H -схемы замещения соединены друг с другом выводами (как того требуют условия непрерывности касательных составляющих вектора магнитной напряженности и векторного магнитного потенциала на границах ячеек). Вследствие периодичности поля выводы ячеек на левой границе расчетной области соединяются с выводами ячеек на правой границе. Выводы ячеек на нижней и верхней границах расчетной области остаются разомкнутыми, так как нижняя и верхняя границы расчетной области соответствуют поверхностям идеального ферромагнетика, где касательная составляющая вектора магнитной напряженности обращается в нуль.

Если решетчатая A - H -схема замещения асинхронного двигателя реализуется в пакете схемотехнического моделирования *Multisim 10*, в свойствах источников задается частота питающего тока, амплитуда и начальная фаза тока.

3. Результаты тестовых расчетов

Для проверки разработанной решетчатой A - H -схемы замещения были

проведены расчеты электромагнитного поля рудничного двигателя двумя различными методами: численно (в программе *Femm 4.2*) и по решетчатой схеме (в пакете схемотехнического моделирования *Multisim 10*). Численный расчет осуществлялся в цилиндрической модели без усреднения свойств. Зубцы статора и ротора в численной цилиндрической модели клиновидные. При этом площадь поперечного сечения зубца в цилиндрической модели равна площади поперечного сечения зубца в плоской развертке, на основе которой создавалась решетчатая *A-H*-схема замещения рудничного двигателя.

Исходные данные для расчета: внутренний диаметр статора 146 мм; рабочий зазор 1 мм; число полюсов 4; число пазов статора 36; число пазов ротора 34; высота зубца статора 18 мм; высота зубца ротора 25 мм; средняя ширина паза статора 7,5 мм; средняя ширина паза ротора 4 мм; удельная электрическая проводимость стержневой ротора $3,445 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; относительная магнитная проницаемость стали 500; частота питающего тока 50 Гц; действующее значение плотности тока в пазах статора 6 А/мм²; номинальное скольжение 0,03.

Решетчатая *A-H*-схема замещения состоит из 90 ячеек (по 18 ячеек в 5 рядов). Один ряд соответствует рабочему зазору и по два ряда — областям статора и ротора.

При численном расчете поле существенно искажается зубцовыми гармониками, что затрудняет непосредственное сопоставление расчетов. Поэтому в тестовых расчетах сравнивались первые гармоники рассчитанных кривых, полученные с помощью численного разложения в ряд Фурье.

На рис. 5 представлена первая гармоника нормальной (к поверхностям статора и ротора) составля-

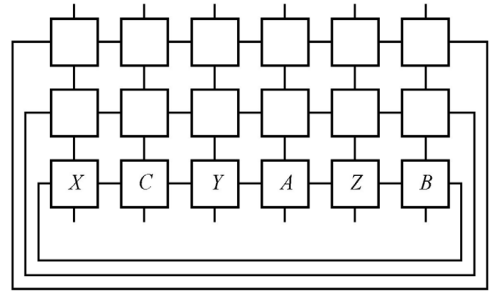


Рис. 4. Упрощенная решетчатая схема замещения асинхронного двигателя
 Fig. 4. The simplified lattice equivalent circuit of the induction motor

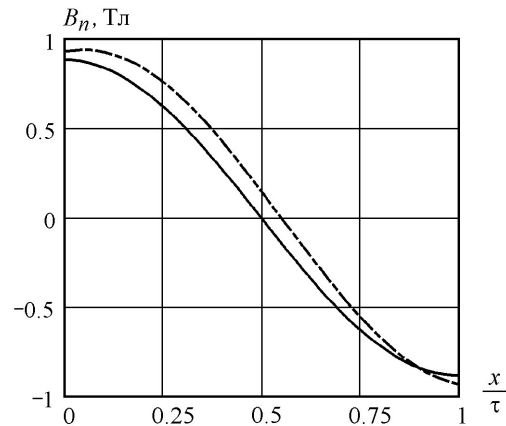


Рис. 5. Первая гармоника нормальной составляющей вектора магнитной индукции в рабочем зазоре: сплошная линия соответствует численному расчету; штриховая линия соответствует расчету по решетчатой схеме

Fig. 5. 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 dash line corresponds to the lattice equivalent circuit

ющей вектора магнитной индукции на средней линии рабочего зазора (при $y = h_1 + \Delta/2$, см. рис. 1), рассчитанная по решетчатой *A-H*-схеме замещения и численно. Сплошная линия соответствует численному расчету, штриховая линия соответствует расчету по решетчатой схеме.

4. Обсуждение результатов

Очевидна хорошая корреляция между численным расчетом и расчетом по решетчатой схеме (в пределах 5 %), что свидетельствует о правильности разработанной расчетной модели.

Как показывает расчетная практика, решетчатые схемы замещения электромагнитных полей малочувствительны к изменениям многих параметров ячеек-многополюсников, и в частности — к уменьшению количества ячеек. В том случае, когда необходимо сделать предварительный расчет электромагнитного поля рудничного двигателя, а высокой точности не требуется, сокращение количества ячеек может представлять определенный практический интерес.

В пакете схемотехнического моделирования *Multisim* на расчет цепей постоянного тока затрачивается гораздо меньше времени по сравнению с цепями переменного тока. Это особенно заметно при большом количестве ячеек. В связи с этим может быть предложен еще один подход, способствующий уменьшению времени расчетов. Для моделирования индуцированного вихревого тока в стержнях ротора можно использовать не реактивное сопротивление (конденсатор), а источник тока, управляемый напряжением. При этом комплексные источники синусоидального тока, моделирующие поле возбуждения асинхронного рудничного двигателя, должны быть заменены источниками постоянного тока. Таким образом, решетчатая схема превращается в схему постоянного тока, при этом время расчетов сократится. Результат моделирования в этом случае представляет собой мгновенные значения токов и напряжений в некоторый фиксированный момент времени. Эту особенность данной решетчатой схемы замещения, в определенном

смысле, можно отнести к ее недостаткам, поскольку схема в этом случае не позволяет в явном виде получить амплитудные значения и начальные фазы токов и напряжений.

В настоящей статье подробное описание решетчатой схемы замещения с источниками постоянного тока не приводится, но может быть осуществлено автором в будущем. Заметим также, что представленная в статье решетчатая $A-H$ -схема замещения с синусоидальными источниками тока может послужить основой для синтеза нелинейной решетчатой $A-H$ -схемы замещения асинхронного рудничного двигателя с короткозамкнутым ротором, в которой свойства стали заданы кривой намагничивания, а расчет осуществляется на основе метода эквивалентных синусоид.

5. Заключение

По результатам выполненной работы могут быть сделаны следующие выводы.

1. На основании законов электромагнетизма осуществлен синтез решетчатой $A-H$ -схемы замещения асинхронного рудничного двигателя с короткозамкнутым ротором. Представленные интегральные соотношения между векторным магнитным потенциалом и вектором магнитной напряженности обеспечивают наглядность, простоту аналитического описания поля и адекватность схемы замещения реальным физическим процессам.

2. Отличительная особенность решетчатой $A-H$ -схемы замещения асинхронного рудничного двигателя состоит в том, что она создана на основе усреднения свойств зубцово-пазовых зон статора и ротора, что значительно упрощает процесс синтеза схемы замещения. В качестве источни-

ков поля в схеме замещения выступают синусоидальные источники тока.

3. Эквивалентность решетчатой А–Н-схемы замещения реальному электромагнитному полю подтверждена тестовыми расчетами. Результаты тестовых расчетов свидетельствуют о правильности и достаточно высокой точности

модели асинхронного рудничного двигателя с короткозамкнутым ротором.

4. Использование решетчатых схем замещения при исследовании электромагнитного поля рудничных двигателей позволит улучшить рабочие характеристики двигателей и расширить область их применения в горной технике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qaseer L., de León F., Purushothaman S. Combined field and circuit theories in squirrel-cage induction motors based on micro-T circuit model // Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 2011, vol. 26, no. 7, pp. 551 – 560.

2. Qaseer L., Purushothaman S., de León F. Closed-form analysis of squirrel-cage induction motors with anisotropic modeling of stator and rotor // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2012, vol. 27, no. 3, pp. 553 – 560. DOI: 10.1109/TEC.2012.2193128.

3. Сарпулов Ф. Н., Фризен В. Э., Швыдкий Е. Л., Смольянов И. А. Математическое моделирование линейного асинхронного двигателя на основе детализированных схем замещения // Электротехника. – 2018. – № 4. – С. 58 – 63.

4. Сарпулов Ф. Н., Смольянов И. А. Исследование тягового линейного асинхронного двигателя конвейерного поезда // Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 1. – С. 39 – 43. DOI: 10.17213/0136-3360-2019-1-39-43.

5. Тарчуткин Н. В., Смольянов И. А., Шмаков Е. И. Моделирование тепловых режимов линейной индукционной машины в MATLAB // Проблемы управления и моделирования в сложных системах (ПУМСС-2019). – 2019. – С. 501 – 504.

6. Инкин А. И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин. – Новосибирск: ЮКЭА, 2002. – 464 с.

7. Литвинов Б. В., Давыденко О. Б. Типовые звенья и каскадные схемы замещения электрических машин. – Новосибирск: НГТУ, 2008. – 215 с.

8. Qaseer L. Micro-T circuit model for double and single sided induction heating systems // Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 2010, vol. 25, no. 2, pp. 713 – 721.

9. Qaseer L. Analysis of double and single sided induction heating systems by layer theory approach // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. 2010, vol. 2, no. 7, pp. 403 – 410. DOI: 10.4236/jema.2010.27052.

10. Qaseer L. Micro-T circuit model for the analysis of cylindrical induction heating systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2010, vol. 25, no. 4, pp. 1021 – 1027. DOI: 10.1109/TEC.2010.2046642.

11. Сарпулов Ф. Н., Сарпулов С. Ф., Фризен В. Э., Болотин К. Е., Усков И. А. Многофункциональный плавильный агрегат на основе индукционной тигельной печи и его моделирование // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике – 2014. – № 1. – С. 154 – 163.

12. Усков И. А., Фризен В. Э., Швыдкий Е. Л. Исследование электромагнитного бокового вращателя // Вопросы электротехнологии – 2015. – № 3 (8). – С. 5 – 9.

13. Torchio R., Di Rienzo L., Codecasa L. Stochastic PEEC method based on polynomial chaos expansion // IEEE Transactions on Magnetics. 2019, vol. 55, no. 6, pp. 1 – 4. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2908588.

14. Torchio R. A volume PEEC formulation based on the cell method for electromagnetic problems from low to high frequency // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019, vol. 67, no. 12, pp. 7452 – 7465. DOI: 10.1109/TAP.2019.2927789.

15. Lombardi L., Romano D., Antonini G. Efficient numerical computation of full-wave partial elements modeling magnetic materials in the PEEC method // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2020, vol. 68, no. 3, pp. 915–925. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2953590.

16. Cao Y. S., Jiang L. J., Ruehli A. E. Distributive radiation and transfer characterization based on the PEEC method // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2015, vol. 57, no. 4, pp. 734–742. DOI: 10.1109/TEMC.2014.2382176.

17. Le Q., Evans T., Peng Y., Mantooth H. A. PEEC method and hierarchical approach towards 3D multichip power module (MCPM) layout optimization // *IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging*. 2019, pp. 131–136. DOI: 10.1109/IWIPP.2019.8799081.

18. Инкин А. И., Алиферов А. И., Бланк А. В. Типовые базовые ячейки-многополюсники решетчатых схем замещения плоскостепенных электромагнитных полей // *Электричество*. – 2014. – № 1. – С. 56–60.

19. Инкин А. И., Алиферов А. И., Бланк А. В. Типовые звенья и решетчатые схемы замещения индукционных магнитоэлектрических систем с движущимся проводящим элементом // *Электричество*. – 2015. – № 12. – С. 38–44.

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. **ИДБ**

REFERENCES

1. Qaseer L., de León F., Purushothaman S. Combined field and circuit theories in squirrel-cage induction motors based on micro-T circuit model. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*. 2011, vol. 26, no. 7, pp. 551–560.

2. Qaseer L., Purushothaman S., de León F., Closed-form analysis of squirrel-cage induction motors with anisotropic modeling of stator and rotor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2012, vol. 27, no. 3, pp. 553–560. DOI: 10.1109/TEC.2012.2193128.

3. Sarapulov F. N., Frizen V. E., Shvydkiy E. L., Smol'yanov I. A. Mathematical modeling of a linear-induction motor based on detailed equivalent circuits. *Elektrotehnika*. 2018, no. 4, pp. 58–63. [In Russ].

4. Sarapulov F. N., Smol'yanov I. A. Research of drive linear induction motor for conveyor train. *Elektromehanika*. 2019, vol. 62 no. 1, pp. 39–43. [In Russ]. DOI: 10.17213/0136-3360-2019-1-39-43.

5. Tarchutkin N. V., Smol'yanov I. A., Shmakov E. I. Simulation of thermal modes of a linear induction machine in MATLAB. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah (PUMSS-2019)*. 2019, pp. 501–504. [In Russ].

6. Inkin A. I. The electromagnetic fields and the parameters of the electric machines, Novosibirsk, UKEA, 2002, 464 p. [in Russ].

7. Litvinov B. V., Davidenko O. B. Standard cells and cascade equivalent circuits of electric machines, Novosibirsk, NSTU, 2008, 215 p. [in Russ].

8. Qaseer L. Micro-T circuit model for double and single sided induction heating systems. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*. 2010, vol. 25, no. 2, pp. 713–721.

9. Qaseer L. Analysis of double and single sided induction heating systems by layer theory approach. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. 2010, vol. 2, no. 7, pp. 403–410. DOI: 10.4236/jemaa.2010.27052.

10. Qaseer L. Micro-T circuit model for the analysis of cylindrical induction heating systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2010, vol. 25, no. 4, pp. 1021–1027. DOI: 10.1109/TEC.2010.2046642.

11. Sarapulov F. N., Sarapulov S. F., Frizen V. E., Bolotin K. E., Uskov I. A. Multifunctional smelter based on induction crucible furnace and its modeling. *Energetika Innovatsionnyye*

napravlenia v energetike. CALS-tehnologii v energetike. 2014, no. 1, pp. 154–163. [In Russ].

12. Uskov I. A., Frizen V. E., Shvydkiy E. L. Research into electromagnetic side stirrer. *Voprosy elektrotehnologii*. 2015, no. 3 (8), pp. 5–9. [In Russ].

13. Torchio R., Di Rienzo L., Codecasa L. Stochastic PEEC method based on polynomial chaos expansion. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2019, vol. 55, no. 6, pp. 1–4. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2908588.

14. Torchio R. A volume PEEC formulation based on the cell method for electromagnetic problems from low to high frequency. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2019, vol. 67, no. 12, pp. 7452–7465. DOI: 10.1109/TAP.2019.2927789.

15. Lombardi L., Romano D., Antonini G. Efficient numerical computation of full-wave partial elements modeling magnetic materials in the PEEC method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2020, vol. 68, no. 3, pp. 915–925. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2953590.

16. Cao Y. S., Jiang L. J., Ruehli A. E. Distributive radiation and transfer characterization based on the PEEC method. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2015, vol. 57, no. 4, pp. 734–742. DOI: 10.1109/TEMC.2014.2382176.

17. Le Q., Evans T., Peng Y., Mantooth H. A. PEEC method and hierarchical approach towards 3D multichip power module (MCPM) layout optimization. *IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging*. 2019, pp. 131–136. DOI: 10.1109/IWIPP.2019.8799081.

18. Inkin A. I., Aliferov A. I., Blanc A. V. The standard basic cell multipoles of the lattice equivalent circuits of the plane-parallel electromagnetic field. *Elektrichestvo*. 2014, no. 1, pp. 56–60. [In Russ].

19. Inkin A. I., Aliferov A. I., Blanc A. V. The standard cells and the lattice equivalent circuits of the induction magnetoelectric systems with the moving conductive element. *Elektrichestvo*. 2015, no. 12, pp. 38–44. [In Russ].

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 АВТОРЕ

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 AUTHOR

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, Russia, e-mail: alblances@yandex.ru.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

