

РЕШЕТЧАТАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО УСТРОЙСТВА ГОРНОРУДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.В. Бланк

Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия, e-mail: ablances@yandex.ru

Аннотация: Все большее распространение в горной промышленности получают линейные асинхронные двигатели, в которых движущаяся часть (так называемый вторичный элемент) изготавливается в виде сплошной биметаллической полосы. Один слой биметаллической полосы – это тонкий проводящий лист, играющий роль короткозамкнутой обмотки. Второй слой – лист из ферромагнитного материала, в котором замыкаются силовые линии магнитного поля. Функционально он аналогичен ядру ротора традиционной электрической машины. Электромагнитному полю таких двигателей присущи особенности, нетипичные для поля вращающихся электрических машин. Большая плотность тока возбуждения, сильное насыщение зубцов статора и ферромагнитного слоя вторичного элемента не позволяют рассчитывать поле линейного асинхронного двигателя в линейной постановке. Представлена нелинейная решетчатая схема замещения для расчета электромагнитного поля линейного асинхронного двигателя, при синтезе которой введены следующие упрощения. Не учитывается неравномерность поля на торцах и по ширине двигателя, поле рассчитывается как плоскопараллельное на двойном полюсном делении. Не учитывается зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от температуры. Не учитываются вихревые токи в статоре и в ферромагнитном слое вторичного элемента. Синтез решетчатой схемы замещения осуществлен в программе для схемотехнического моделирования Micro-Cap 7, тестовые численные расчеты – в программе Femm 4.2, реализующей метод конечных элементов. Сравнение результатов моделирования линейного асинхронного двигателя с численными расчетами свидетельствует о правильности и довольно высокой точности разработанной расчетной модели.

Ключевые слова: горнорудное электрооборудование, транспортные устройства, линейные асинхронные двигатели, массивный вторичный элемент, решетчатые схемы замещения, нелинейные магнитные свойства, теория электромагнитного поля, теория электрических цепей.

Для цитирования: Бланк А. В. Решетчатая схема замещения линейного асинхронного двигателя транспортного устройства горнорудного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 2. – С. 157–169. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_157.

Lattice equivalent circuit for induction motors of transport units of mining equipment

A.V. Blanc

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The mining industry increasingly wider uses linear induction motors with a live part (the so-called secondary cell) made as a solid bimetallic plate. One layer of the bimetallic plate is a thin conducting sheet which acts as a short-circuit winding. The second layer is a ferromagnetic sheet to bridge lines of fluxes of magnetic field. Functionally, this is an analog of a rotor frame of a conventional electrical machine. Electromagnetic field of such motors possesses features uncharacteristic for the field of rotating electrical machines. High density of the drive current, and high current saturation of the stator teeth and the ferromagnetic layer of the secondary cell make it impossible to calculate the field of a linear induction motor in a linear formulation. The article describes a nonlinear lattice equivalent circuit for calculating electromagnetic field of a linear induction motor, which is synthesized using some simplifications. The field nonuniformity at the faces and across the width of the motor is disregarded, and the field is calculated as a plane-parallel field at a double polar pitch. The temperature dependence of the magnetic capacity of the ferromagnet is neglected. The eddy currents in the stator and in the ferromagnetic layer of the secondary cell are bypassed. The lattice equivalent circuit is synthesized in circuit analysis program Micro-Cap 7, and the test calculations are carried out in FEM-based program Femm 4.2. The comparison of the modeling and calculation results of a linear induction motor prove correctness and high accuracy of the developed computational model.

Key words: electric mining equipment, transport units, linear induction motors, massive secondary cell, lattice equivalent circuits, nonlinear magnetic properties, electromagnetic field theory, circuit theory.

For citation: Blanc A. V. Lattice equivalent circuit for induction motors of transport units of mining equipment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(2):157-169. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_157.

Введение

Все большее распространение в горной промышленности получают линейные двигатели — электрические машины и аппараты, в которых движущаяся часть перемещается вдоль статора прямолинейно (поскольку движущаяся часть не вращается, она не может называться ротором и носит название «бегун» или «вторичный элемент»). На основе линейных двигателей создаются транспортные конвейеры [1], электромагнитные молоты для забивки свай в нефтескважины [2], породоразрушающие машины [3, 4], виброисточники для нефтескважин [5, 6] и для сейсмического просвечивания [7], насосные установки [8 — 10].

Во многом линейные двигатели по конструкции и по принципам действия аналогичны традиционным вращающимся электрическим машинам. Можно выде-

лить в отдельные группы асинхронные линейные двигатели [11 — 13], синхронные линейные двигатели с постоянными магнитами [14 — 16], вентильные линейные двигатели [8 — 10].

Вместе с тем, линейным двигателям часто присущи конструктивные особенности, которые трудно отыскать аналогию среди электрических машин общепромышленного назначения. С этой точки зрения, совершенно особая группа — цилиндрические линейные двигатели [8 — 10] (в зарубежной литературе известные как *tubular linear motors* [17 — 19]). В таком линейном двигателе обмотка возбуждения — это ряд цилиндрических катушек, полюса статора — ферромагнитные шайбы между катушками, а вторичный элемент — труба из проводящего ферромагнитного материала, которая перемещается внутри этих ка-

тушек и шайб. К линейным двигателям относятся также электромагнитные молоты с импульсным полем возбуждения [2 – 4], конструктивно более близкие к электрическим аппаратам, нежели к электрическим машинам.

Электромагнитное поле в рабочем объеме линейного двигателя также обладает особенностями, отличающими его от поля вращающихся электрических машин. Прежде всего, это неравномерность поля на торцах и по ширине двигателя. В электромагнитных расчетах эта неравномерность может быть учтена с помощью введения поправочных коэффициентов, при этом поле можно рассчитывать как плоскопараллельное на двойном полюсном делении.

Гораздо более серьезную проблему представляет тот факт, что отношение рабочего зазора к полюсному делению у линейных двигателей, как правило, больше, чем у электрических машин традиционной конструкции. Если поле возбуждения создается не постоянными магнитами, а обмотками (например, в асинхронных двигателях), это ведет к очень большой плотности тока в системе возбуждения.

В асинхронных линейных двигателях вторичный элемент часто изготавливается в виде сплошной биметаллической полосы, в которой один слой — это тонкий проводящий лист из меди или алюминия (играющий роль короткозамкнутой обмотки), а второй слой — лист из ферромагнитного материала. В этом ферромагнитном слое замыкаются силовые линии магнитного поля, и функционально он аналогичен ярму ротора традиционной электрической машины. Из конструктивных соображений ферромагнитный слой вторичного элемента не может быть слишком толстым. Поэтому магнитная индукция в нем чрезвычайно велика.

Таким образом, и зубцы статора, и ферромагнитный слой вторичного элемента,

как правило, значительно насыщены (сравнительно массивное ярмо статора при расчетах можно полагать ненасыщенным, обладающим свойствами идеального ферромагнетика). Магнитная проницаемость зубцов статора и ферромагнитного слоя сильно зависит от магнитной напряженности, и задача по расчету поля не может быть решена в линейной постановке. Кроме того, большие плотности тока ведут к значительному нагреву линейного асинхронного двигателя (до нескольких сотен градусов Цельсия). При нагреве уменьшается магнитная проницаемость ферромагнетиков, и это обстоятельство, в общем случае, следует учитывать при расчетах.

Известно, что при питании синусоидальным током системы возбуждения, имеющей нелинейные магнитные свойства, магнитный поток неизбежно будет несинусоидальным. В электромагнитных расчетах таких систем пользуются методом эквивалентных синусоид, полагая, что все возможные искажения магнитного потока проявляются лишь в высших гармониках, а первая гармоника магнитного потока пропорциональна питающему току. Кривые намагничивания ферромагнетиков в этом случае должны быть построены для действующих значений магнитной напряженности и индукции.

В настоящей статье представлена расчетная схема замещения, предназначенная для расчета электромагнитного поля в рабочем объеме линейного асинхронного двигателя транспортного устройства горнорудного оборудования. Статья представляет собой продолжение статьи [20], посвященной расчету электромагнитного поля асинхронного двигателя традиционной конструкции с короткозамкнутым ротором.

Объектом моделирования выбран линейный асинхронный двигатель конвейерного транспорта, изготовленный для

Междуреченского ГОК производственного объединения «Кемерово-уголь» и подробно описанный в [1].

Поскольку представленная в настоящей статье работа призвана лишь доказать принципиальную возможность расчета столь сложных нелинейных систем, при создании решетчатой схемы замещения был введен ряд следующих упрощений. Не учитывается неравномерность поля на торцах и по ширине двигателя, поле рассчитывается как плоскопараллельное. Не учитывается зависимость магнитной проницаемости от температуры. Не учитываются вихревые токи в ферромагнитном слое вторичного элемента и в статоре (так как статор всегда изготавливается шихтованным). Ядро статора в решетчатой схеме замещения отсутствует, так как считается идеальным ферромагнетиком. В численной модели, используемой для тестовых расчетов, ядро статора обладает теми же свойствами, что зубцы и ферромагнитный слой вторичного элемента. Кроме того, численный расчет осуществлен по всей длине линейного двигателя, а не на двойном полюсном делении, как это сделано в решетчатой схеме замещения. Синтез решетчатой схемы замещения выполнен в программе для схемотех-

нического моделирования Micro-Cap 7, численные расчеты — в программе Femm 4.2, реализующей метод конечных элементов.

Методы моделирования. Численная модель и решетчатая схема замещения линейного асинхронного двигателя

Линейный асинхронный двигатель, выступающий в качестве объекта моделирования, имеет следующие параметры: длина индуктора 792 мм; толщина индуктора 130 мм; глубина паза 64 мм; ширина паза 12 мм; ширина зубца 10 мм; число пазов 36; число пазов на полюс и фазу 2; рабочий зазор 15 мм; толщина медного слоя вторичного элемента 3 мм; толщина ферромагнитного слоя вторичного элемента 6 мм; удельная электрическая проводимость меди $5,8 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; частота питающего тока 50 Гц; действующее значение плотности тока в пазах статора $13,2 \text{ А/мм}^2$; номинальное скольжение 0,25. Магнитная проницаемость стали зависит от напряженности магнитного поля и описывается кривой, изображенной на рис. 1, где обозначены: μ_{Fe} — магнитная проницаемость стали, Гн/м; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; H — действующее зна-

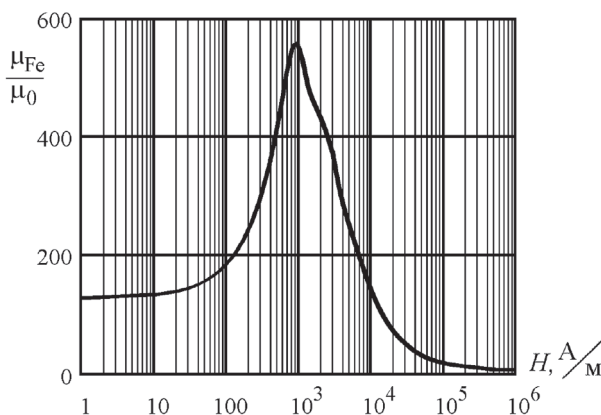


Рис. 1. Зависимость магнитной проницаемости стали от напряженности магнитного поля
Fig. 1. The dependence of the steel magnetic permeability on the magnetic field intensity

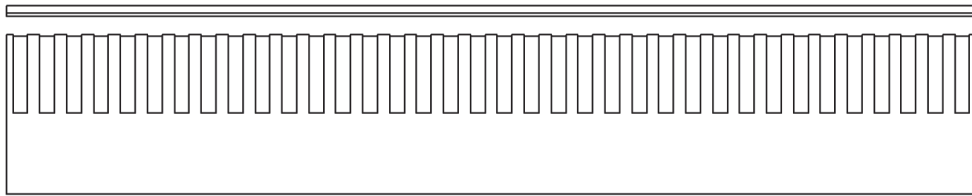


Рис. 2. Численная модель линейного асинхронного двигателя

Fig. 2. The numerical model of the linear induction motor

чение напряженности магнитного поля, А/м.

Численная плоскопараллельная модель линейного асинхронного двигателя (рис. 2) включает в себя статор, рабочий зазор, биметаллический вторичный элемент и воздушное пространство вблизи от двигателя и на удалении. Внешняя граница расчетной области представляет собой окружность, которая на рис. 2 не показана, так как ее радиус намного больше размеров линейного двигателя. На этой границе задано граничное условие, приближенно моделирующее нулевой векторный потенциал в бесконечно далекой точке.

Воздушное пространство вокруг двигателя необходимо включать в расчетную область не только из-за неравномерности поля на торцах двигателя, но и из-за насыщенности ферромагнитного слоя вторичного элемента, которая приводит к тому, что силовые линии поля проникают за пределы ферромагнетика и замыкаются в воздушном пространстве.

При синтезе решетчатой схемы замещения зубцово-пазовая зона статора заменяется анизотропной средой. В [20] составляющие магнитной проницаемости в анизотропной среде описывались выражениями, полученными 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_x, μ_y — составляющие магнитной проницаемости в горизонтальном и вертикальном направлении, Гн/м; t_z — зубцовое деление статора, м; b — ширина паза статора, м.

При условии $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ (важно отметить, что даже при очень сильном насыщении ферромагнетика это условие выполняется) выражения (1) и (2) можно упростить, тогда от магнитной напряженности будет зависеть только вертикальная составляющая магнитной проницаемости:

$$\mu_x = \mu_0 \frac{t_z}{b}, \quad (3)$$

$$\mu_y(H) = \mu_{Fe}(H) \frac{t_z - b}{t_z}. \quad (4)$$

В отличие от численной модели, в решетчатой схеме замещения электромагнитное поле моделируется на двойном полюсном делении. Это позволяет на вертикальных границах расчетной области задать периодическое граничное условие. Нижняя граница расчетной области соответствует поверхности яра статора, на которой отсутствует касательная составляющая магнитной напряженности. Это еще одно граничное условие.

Из-за насыщенности ферромагнитного слоя вторичного элемента выбор верхней границы расчетной области весьма проблематичен. Если бы сталь была ненасыщенной, все силовые линии поля замыкались бы в ферромагнитном слое, а на его внешней поверхности можно было бы приравнять к нулю векторный

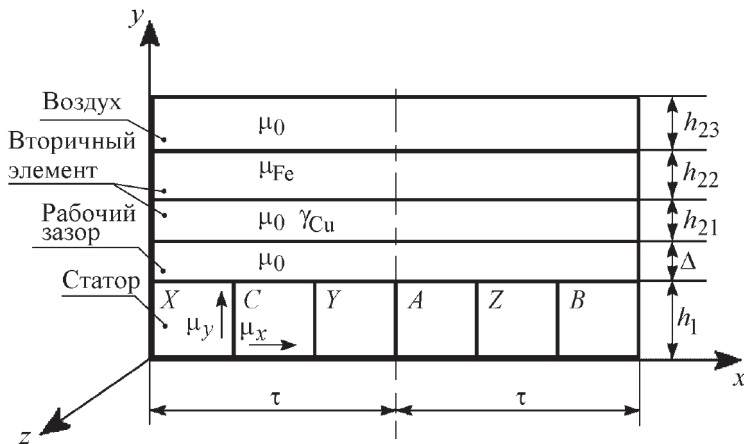


Рис. 3. Слоистая модель линейного асинхронного двигателя
 Fig. 3. The laminated model of the linear induction motor

потенциал. Поверхность с нулевым векторным потенциалом называют поверхностью магнитной изоляции, так как сквозь нее не проникают силовые линии поля.

Для моделирования верхней границы расчетной области введем допущение о том, что хотя поле и проникает за пределы ферромагнетика, но уже на некотором расстоянии от него практически полностью рассеивается. Если сверху в расчетную область добавить слой воздушного пространства (пусть его ширина будет равна 20 мм), то на его внешней границе в качестве граничного условия можно задать нулевой векторный потенциал. Таким образом, поле будет существовать не только в ферромагнетике, но и за его пределами.

Слоистая модель, на основе которой синтезируется решетчатая схема замещения, изображена на рис. 3, где оси декартовой системы координат обозначены буквами x , y , z . Фазы обмотки статора обозначены буквами $A - X$, $B - Y$, $C - Z$. Полюсное деление равно τ . Высота зубцов статора равна h_1 , составляющие магнитной проницаемости в зубцово-пазовой зоне статора в направлении осей координат — μ_x , μ_y . Рабочий зазор равен

Δ , его магнитная проницаемость равна μ_0 . Толщина проводящего слоя вторичного элемента равна h_{21} , его магнитная проницаемость — μ_0 , проводимость — γ_{Cu} . Толщина ферромагнитного слоя вторичного элемента равна h_{22} , его магнитная проницаемость — μ_{Fe} . Ширина воздушного пространства над вторичным элементом — h_{23} , его магнитная проницаемость — μ_0 .

Решетчатая схема замещения линейного асинхронного двигателя — это совокупность прямоугольных ячеек, на которые разбита расчетная область. Каждая ячейка моделирует поле в малом объеме расчетной области. Схемы замещения ячеек (рис. 4) содержат линейные и нелинейные сопротивления, аналогом напряжения служит векторный потенциал (A_1, A_2, A_3, A_4), аналогом тока — касательные составляющие вектора магнитной напряженности, умноженные на размер ячейки в вертикальном или горизонтальном направлении ($H_{1y}\Delta y, H_{2y}\Delta y, H_{3x}\Delta x, H_{4x}\Delta x$).

Ячейки синтезированы на основе законов теории электромагнитного поля. Подробно об этом написано в [20], поэтому здесь приведем лишь итоговые выражения для параметров ячеек. В схеме

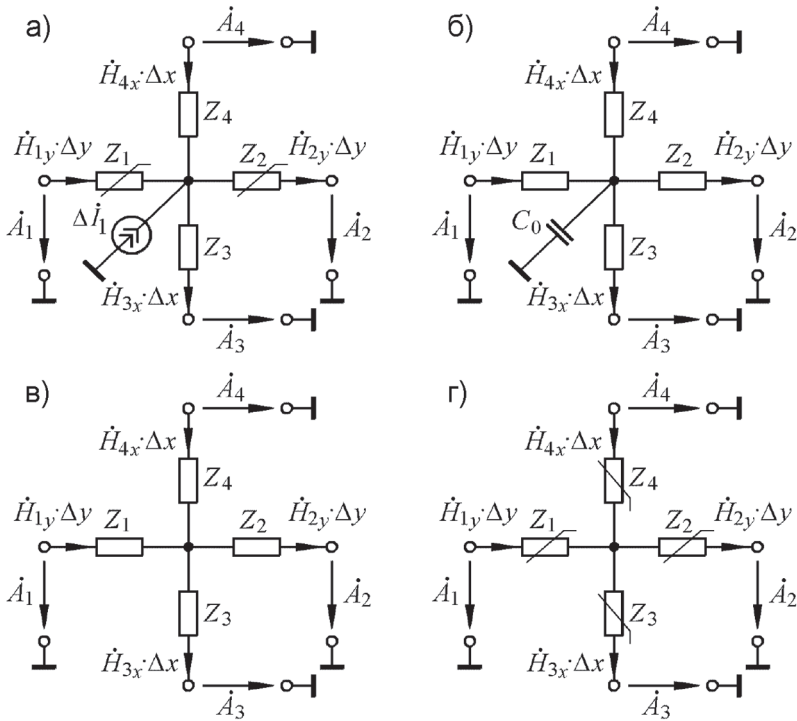


Рис. 4. Схемы замещения ячеек статора (а), проводящего слоя (б), воздушного пространства (в), ферромагнитного слоя (г)

Fig. 4. The equivalent circuits of the cells: the stator (а), the conductive layer (б), the air gap (в), the ferromagnetic layer (г)

замещения ячейки статора (см. рис. 4, а) горизонтальные сопротивления нелинейные, а вертикальные сопротивления не зависят от магнитной напряженности:

$$Z_1(H) = Z_2(H) = \mu_y(H) \frac{\Delta x}{2\Delta y} = \mu_{Fe}(H) \Delta x \frac{t_z - b}{2t_z \Delta y} \quad (5)$$

$$Z_3 = Z_4 = \mu_x \frac{\Delta y}{2\Delta x} = \mu_0 \Delta y \frac{t_z}{2b\Delta x}, \quad (6)$$

где Δx , Δy — размеры ячейки в горизонтальном и вертикальном направлении, м.

Комплексный источник тока $\Delta \dot{I}_1$ (рис. 4, а) описывается выражением

$$\Delta \dot{I}_1 = \delta \frac{b}{t_z} \Delta x \Delta y, \quad (7)$$

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

Активные сопротивления ячеек проводящего слоя вторичного элемента и воздушного пространства (рис. 4, б, в) описываются выражениями

$$Z_1 = Z_2 = \mu_0 \frac{\Delta x}{2\Delta y}, \quad (8)$$

$$Z_3 = Z_4 = \mu_0 \frac{\Delta y}{2\Delta x}. \quad (9)$$

Конденсатор в схеме замещения ячейки проводящего слоя (рис. 4, б) моделирует индуцированный вихревой ток:

$$C_0 = s \gamma_{Cu} \Delta x \Delta y, \quad (10)$$

где s — скольжение; γ_{Cu} — проводимость слоя, $Om^{-1} \cdot m^{-1}$.

В схеме замещения ячейки ферромагнитного слоя вторичного элемента (рис. 4, з) все сопротивления нелинейные:

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

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

Нелинейные сопротивления ячеек статора моделируются в решетчатой схеме замещения в виде отдельных схем-макросов, в которых ток через нелинейное сопротивление создается с помощью управляемого источника тока, а кривая магнитной проницаемости (см. рис. 1) задана в виде таблицы в управляемом источнике ЭДС. То есть сопротивления, описываемые выражением (5), определяются в процессе расчета схемы замещения автоматически. Этот подход оказался неприменим к нелинейным сопротивлениям ячеек ферромагнитного слоя вторичного элемента.

При больших значениях магнитной напряженности рабочая точка перемещается на резко падающий участок кривой на рис. 1, и процесс расчета становится очень неустойчивым.

Выход из сложившегося положения был найден. Он состоит в том, чтобы вычислять сопротивления ячеек ферромагнитного слоя методом итераций. Магнитная напряженность в ферромагнитном слое практически постоянна по всему его объему. Значит, постоянна и магнитная проницаемость. Обозначим далее эту постоянную магнитную проницаемость μ_{Fe2} . Тогда выражения (11) и (12) примут вид

$$Z_1 = Z_2 = \mu_{Fe2} \frac{\Delta x}{2\Delta y}, \quad (13)$$

$$Z_3 = Z_4 = \mu_{Fe2} \frac{\Delta y}{2\Delta x}. \quad (14)$$

Это означает, что сопротивления ячеек ферромагнитного слоя (при заранее известной магнитной проницаемости) можно использовать в решетчатой схеме замещения как линейные сопротивления.

Итерационный процесс строится так. В начале расчета задается первое приближение магнитной проницаемости. По выражениям (13) и (14) вычисляются сопротивления ячеек. Производится расчет схемы замещения. Результат этого расчета — магнитная напряженность в ферромагнитном слое вторичного элемента. По кривой на рис. 1 определяется следующее приближение магнитной проницаемости, соответствующее магнитной напряженности. По выражениям (13) и (14) снова вычисляются сопротивления ячеек, расчет схемы замещения повторяется. Итерации прекращаются в тот момент, когда очередное приближение магнитной проницаемости будет лишь весьма незначительно отличаться от предыдущего приближения. Итерационный процесс сходится к правильному решению после трех-четырех итераций.

На рис. 5 изображена упрощенная решетчатая схема замещения линейного асинхронного двигателя, состоящая из 30 ячеек. Пять рядов ячеек соответствуют слоям расчетной модели на рис. 3. Первый ряд ячеек — зубцово-пазовая зона статора (обозначена буквами А—Х, В—У, С—Z). Второй ряд — рабочий зазор (обозначен μ_0). Третий ряд — проводящий слой вторичного элемента (обозначен γ_{Cu}). Четвертый ряд — ферромагнитный слой вторичного элемента (обозначен μ_{Fe2}). Пятый ряд — воздушное пространство за пределами вторичного элемента (обозначено μ_0). Ячейки решетчатой схемы замещения соединяются выводами в соответствии с условиями непрерывности векторного потенциала и касательных составляющих вектора магнитной напряженности.

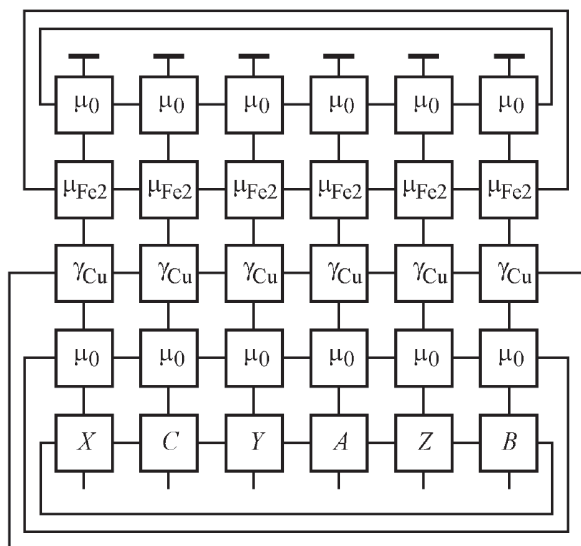


Рис. 5. Упрощенная решетчатая схема замещения линейного асинхронного двигателя
 Fig. 5. The simplified lattice equivalent circuit of the linear induction motor

Нижние разъемы ячеек нижнего ряда разомкнуты (отсутствие касательной составляющей вектора магнитной напряженности). Верхние разъемы ячеек верхнего ряда заземлены (равенство нулю векторного потенциала). Левые разъемы ячеек на левой вертикальной границе соединены с правыми разъемами ячеек на правой вертикальной границе (условие периодичности поля).

Результаты тестовых расчетов

В тестовых расчетах использовалась решетчатая схема замещения линейного асинхронного двигателя, состоящая из 192 ячеек (16 горизонтальных рядов по 12 ячеек в каждом ряду). Зубцово-пазовая зона статора — четыре ряда. Рабочий зазор — три ряда. Проводящий слой вторичного элемента — два ряда. Ферромагнитный слой вторичного элемента — три ряда. Воздушное пространство над вторичным элементом — четыре ряда.

При численном расчете линейного асинхронного двигателя вместо проводимости медного слоя введена расчет-

ная проводимость, равная проводимости меди, умноженной на скольжение. Так в расчете учитывался тот факт, что в реальном асинхронном двигателе частота тока во вторичном элементе не совпадает с частотой тока в статоре.

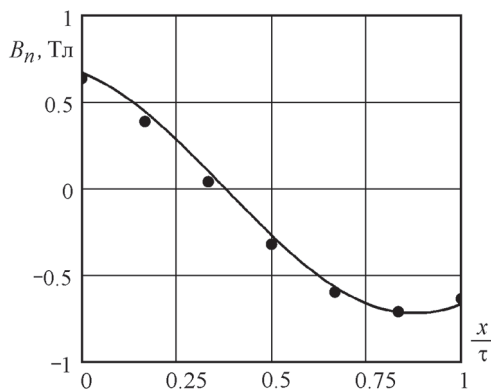


Рис. 6. Первая гармоника нормальной составляющей вектора магнитной индукции в рабочем зазоре: сплошная линия соответствует численному расчету; точки соответствуют расчету по решетчатой схеме замещения

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

В качестве результатов расчетов использовались первые гармоники действительной части рассчитанных комплексных величин, соответствующие распределению поля на полюсном делении двигателя в некоторый фиксированный момент времени. Эти первые гармоники получены посредством численного разложения в ряд Фурье.

На рис. 6 изображена первая гармоника нормальной (к поверхностям вторичного элемента и статора) составляющей вектора магнитной индукции на средней линии рабочего зазора.

На рис. 6 имеются следующие обозначения: τ — полюсное деление двигателя, м; x — текущая координата, м; B_n — первая гармоника нормальной составляющей вектора магнитной индукции, Тл. Сплошная линия соответствует численному расчету, точки соответствуют расчету по решетчатой схеме замещения.

Обсуждение результатов

Очевидна очень хорошая корреляция между численным расчетом и расчетом по решетчатой схеме (в пределах 2%). Это свидетельствует, с одной стороны, о правильности исходной математической модели, с другой стороны — о правильности разработанной решетчатой схемы и отсутствии ошибок при ее практической реализации.

Также можно говорить о довольно высокой точности расчета даже при относительно небольшом количестве ячеек решетчатой схемы замещения. Практическое использование решетчатой схемы облегчается еще и тем, что все ячейки прямоугольные и однотипные, и в большинстве подобластей (рабочий зазор, проводящий слой, ферромагнитный слой) ячейки могут быть одинаковыми.

К сожалению, объем статьи не позволяет подробно описать алгоритм и реа-

лизацию в программах схемотехнического моделирования автоматического вычисления нелинейных сопротивлений на основе управляемых источников тока и управляемых источников ЭДС. В дальнейшем это может стать темой отдельной, весьма обстоятельной статьи.

Также особого интереса заслуживает разработка решетчатых схем замещения линейных двигателей других типов, например, цилиндрических линейных двигателей (асинхронных, синхронных, вентильных), которые также широко используются в горной промышленности. Этой работой автор планирует заняться в ближайшем будущем.

Заключение

Выводы из представленной работы сводятся к нескольким пунктам.

1. На основе фундаментальных законов теории электромагнитного поля создана решетчатая схема замещения линейного асинхронного двигателя транспортного устройства горнорудного оборудования. Расчет электромагнитного поля в решетчатой схеме замещения осуществляется в нелинейной постановке (магнитная проницаемость ферромагнетиков зависит от магнитной напряженности).

2. Сравнение расчетов по решетчатой схеме замещения с тестовыми численными расчетами свидетельствует не только о правильности теоретических положений, на основе которых создана решетчатая схема замещения линейного асинхронного двигателя, но и о довольно высокой точности решетчатой схемы.

3. Простота реализации решетчатых схем замещения позволяет использовать их для предварительных электромагнитных расчетов при создании и совершенствовании линейных двигателей, когда требуется часто менять исходные данные задачи. Решетчатые схемы замеще-

ния также могут быть использованы для тестовых расчетов на начальном этапе создания численных моделей электромагнитного поля, когда правильность численной модели должна контролироваться с помощью других расчетных методов, отличающихся от метода конечных элементов.

4. Дальнейшее развитие предложенного расчетного метода позволит ввести в решетчатые схемы замещения линейных двигателей зависимость магнитной проницаемости от температуры, создавать решетчатые схемы замещения, мо-

делирующие неравномерность поля по ширине и на торцах двигателя, создавать решетчатые схемы замещения других типов линейных двигателей (особый интерес в этом смысле представляют, например, цилиндрические линейные двигатели).

5. Применение решетчатых схем замещения в электромагнитных расчетах линейных двигателей позволит улучшать их технические характеристики, а это, в свою очередь, приведет к более эффективному использованию горнорудного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Симонов Б. Ф., Вовк В. С., Погарский Ю. В., Кадышев А. И. Электромагнитные молоты для морского нефтегазопромыслового строительства // Ргонефть. Профессионально о нефти. — 2019. — № 2(12). — С. 59–65. DOI: 10.24887/2587-7399-2019-2-59-65.

3. Васин К. А., Едыгенов Е. К., Алдияров Н. У., Воронин В. В. Методика цифрового измерения динамических и энергетических характеристик породоразрушающей машины для безвзрывного разрушения горных пород // Вестник ТОГУ. — 2019. — № 3 (54). — С. 9–16.

4. Едыгенов Е. К. Горные машины с линейным электромагнитным двигателем // Современные проблемы теории машин. — 2019. — № 8. — С. 81–84. DOI: 10.26160/2307-342X-2019-8-81-84.

5. Симонов Б. Ф., Кордубайло А. О., Нейман В. Ю., Полищук А. Е. Рабочие процессы в импульсном линейном электромагнитном приводе скважинного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 1. — С. 71–78. DOI: 10.15372/FTPRPI20180109.

6. Леуткин А. А. Повышение эффективности системы питания и управления скважинного виброисточника / Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов XVI Всероссийской научной конференции молодых ученых. Т. 6. — 2022. — С. 35–38.

7. Кордубайло А. О., Симонов Б. Ф. Исследование конструкций скважинного электромагнитного импульсного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — № 5. — С. 146–153. DOI: 10.15372/FTPRPI20200517.

8. Турпак А. М. Регистрация конечного положения штока при косвенном векторном управлении погружного линейного двигателя / Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. Т. 1. — 2017. — С. 138–144.

9. Конев К. А., Фурина А. О., Коротаяев А. Д., Чабанов Е. А. Цилиндрический линейный вентильный двигатель для добычи нефти бесштанговым методом // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2021. — № 39. — С. 150–168. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.08.

10. Артыкаева Э. М., Васильева Л. Н. Линейный цилиндрический вентильный двигатель для добычи нефти // Вестник Чувашского университета. — 2023. — № 2. — С. 18–23. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-2-18-23.

11. Elmorshedy M. F., Xu W., Liu Y., Allam S. M., Ali M. M., Dong M. Sensorless direct thrust control of a linear induction motor based on MRAS / 12th International Symposium on Linear Drives

for Industry Applications (LDIA), Neuchatel, Switzerland. 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/LDIA.2019.8770984.

12. Accetta A., Cirrincione M., Pucci M., Sferlazza A. State space-vector model of linear induction motors including end-effects and iron losses. Part I: Theoretical analysis // IEEE Transactions on Industry Applications. 2020, vol. 56, no. 1, pp. 235–244. DOI: 10.1109/TIA.2019.2952031.

13. Sun Z., Xu L., Zhao W., Du K. Comparison between linear induction motor and linear primary permanent magnet vernier motor for railway transportation / 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), Wuhan, China. 2021, pp. 1–6. DOI: 10.1109/LDIA49489.2021.9505835.

14. Li Z., Zhou S., Xiao Y., Wang L. Sensorless vector control of permanent magnet synchronous linear motor based on self-adaptive super-twisting sliding mode controller // IEEE Access. 2019, vol. 7, pp. 44998–45011. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909308.

15. Jiang D., Yu W., Wang J., Zhao Y., Li Y., Lu Y. A speed disturbance control method based on sliding mode control of permanent magnet synchronous linear motor // IEEE Access. 2019, vol. 7, pp. 82424–82433. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2922765.

16. Lv G., Zhang Z., Liu Y., Zhou T. Analysis of forces in linear synchronous motor with propulsion, levitation and guidance for high-speed maglev // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2022, vol. 10, no. 3, pp. 2903–2911. DOI: 10.1109/JESTPE.2021.3065459.

17. Poltschak F., Thalhammer R. Winding layout for active bearing force reduction in tubular linear motors / 12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), Neuchatel, Switzerland. 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/LDIA.2019.8771022.

18. Tan Q., Huang X., Li L., Wang M. Analysis of flux linkage and detent force for a modular tubular permanent magnet synchronous linear motor with large slots // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2019, vol. 34, pp. 1532–1541. DOI: 10.1109/TEC.2019.2912873.

19. Consolo V., Musolino A., Rizzo R., Sani L. Design of a dual Halbach array tubular linear motor for long stroke and large force / International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden. 2020, pp. 647–653. DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270700.

20. 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. **PLAB**

REFERENCES

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

2. Simonov B. F., Vovk V. S., Pogarskii Yu. V., Kadyshchev A. I. Electromagnetic hammers for marine construction in petroleum production. *PROneft. Professionally about Oil*. 2019, no. 2(12), pp. 59–65. DOI: 10.24887/2587-7399-2019-2-59-65.

3. Vasin K. A., Edygenov E. K., Aldiyarov N. U., Voronin V. V. Digital measurement technique dynamic and energy characteristics of the break-destructive machine for unlimited destruction of mountain breeds. *Bulletin of Pacific national university*. 2019, no. 3 (54), pp. 9–16. [In Russ].

4. Edygenov E. K. Linear electromagnetic motor mining machines. *Modern problems of the theory of machines*. 2019, no. 8, pp. 81–84. [In Russ]. DOI: 10.26160/2307-342X-2019-8-81-84.

5. Simonov B. F., Kordubaylo A. O., Neyman V. Yu., Polischuk A. E. Working processes in the pulse leaner electromagnetic drive of the downhole vibrosourсe. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2018, no. 1, pp. 71–78. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20180109.

6. Leutkin A. A. Increasing the efficiency of the power supply and control system of the downhole vibrosourсe. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii. Sbornik nauchnykh trudov XVI Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh* [Sciences'. Technologies. Innovation. Collection of scientific papers of the XVI All-Russian Scientific Conference of Young Scientists], vol. 6. 2022, pp. 35–38. [In Russ].

7. Kordubaylo A. O., Simonov B. F. The research of the constructions of the downhole electromagnetic pulse vibrosourсe. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2020, no. 5, pp. 146–153. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20200517.

8. Turpak A. M. Recording the rod end position in the indirect vector control of the immersed linear motor. *Aktual'nye problemy povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gornoshakhtnogo i*

neftepromyslovogo oborudovaniya [Actual problems of increasing the efficiency and safety of mining and oilfield equipment operation], vol. 1. 2017, pp. 138 – 144. [In Russ].

9. Konev K. A., Furina A. O., Korotaev, A. D., Chabanov E. A. Cylindrical linear valve motor for shaftless oil recovery. *Perm national research polytechnic university bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*. 2021, no. 39, pp. 150 – 168. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.08.

10. Artykaeva E. M., Vasileva L. N. Linear cylindrical valve motor for oil extraction. *Vestnik Chuvshskogo universiteta*. 2023, no. 2, pp. 18 – 23. [In Russ]. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-2-18-23.

11. Elmorshedy M. F., Xu W., Liu Y., Allam S. M., Ali M. M., Dong M. Sensorless direct thrust control of a linear induction motor based on MRAS. *12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, Neuchatel, Switzerland. 2019, pp. 1 – 6. DOI: 10.1109/LDIA.2019.8770984.

12. Accetta A., Cirrincione M., Pucci M., Sferlazza A. State space-vector model of linear induction motors including end-effects and iron losses. Part I: Theoretical analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2020, vol. 56, no. 1, pp. 235 – 244. DOI: 10.1109/TIA.2019.2952031.

13. Sun Z., Xu L., Zhao W., Du K. Comparison between linear induction motor and linear primary permanent magnet vernier motor for railway transportation. *13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, Wuhan, China. 2021, pp. 1 – 6. DOI: 10.1109/LDIA49489.2021.9505835.

14. Li Z., Zhou S., Xiao Y., Wang L. Sensorless vector control of permanent magnet synchronous linear motor based on self-adaptive super-twisting sliding mode controller. *IEEE Access*. 2019, vol. 7, pp. 44998 – 45011. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909308.

15. Jiang D., Yu W., Wang J., Zhao Y., Li Y., Lu Y. A speed disturbance control method based on sliding mode control of permanent magnet synchronous linear motor. *IEEE Access*. 2019, vol. 7, pp. 82424 – 82433. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2922765.

16. Lv G., Zhang Z., Liu Y., Zhou T. Analysis of forces in linear synchronous motor with propulsion, levitation and guidance for high-speed maglev. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2022, vol. 10, no. 3, pp. 2903 – 2911. DOI: 10.1109/JESTPE.2021.3065459.

17. Poltschak F., Thalhammer R. Winding layout for active bearing force reduction in tubular linear motors. *12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, Neuchatel, Switzerland. 2019, pp. 1 – 6. DOI: 10.1109/LDIA.2019.8771022.

18. Tan Q., Huang X., Li L., Wang M. Analysis of flux linkage and detent force for a modular tubular permanent magnet synchronous linear motor with large slots. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2019, vol. 34, pp. 3, pp. 1532 – 1541. DOI: 10.1109/TEC.2019.2912873.

19. Consolo V., Musolino A., Rizzo R., Sani L. Design of a dual Halbach array tubular linear motor for long stroke and large force. *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Gothenburg, Sweden. 2020, pp. 647 – 653. DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270700.

20. 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, no. 12-2, pp. 58 – 69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_58.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бланк Алексей Валерьевич – канд. техн. наук, доцент,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: alblances@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-0582-1257.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

A. V. Blanc, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia,
e-mail: alblances@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-0582-1257.

Получена редакцией 28.06.2024; получена после рецензии 31.08.2024; принята к печати 10.01.2025.
Received by the editors 28.06.2024; received after the review 31.08.2024; accepted for printing 10.01.2025.