

УДК 621.365.53; 621.313

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА

В.П. Певчев, Е.В. Стрижакова, В.Н. Овсянников

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Рассмотрен комплекс вопросов по моделированию электромагнитных процессов в линейном асинхронном двигателе, представляющем собой систему, содержащую статорную обмотку, стальной корпус печи и расплавленный металл. Эффективное перемешивание жидкого металла реализуется в однофазном режиме питания статорной обмотки. Для линейного перемещения расплава, необходимого при скачивании шлака, используется двухфазное напряжение. Расчет электромагнитных сил, обеспечивающих режимы циркуляции и линейного перемещения, осуществлен численным методом моделирования электромагнитного поля. Большой зазор между статором и расплавом, а также наличие между ними стальной оболочки приводят к низким значениям коэффициента полезного действия и коэффициента мощности. Поиск выгодного соотношения между шириной паза и зубца выполнен с учетом ограничений на допустимые значения индукции в магнитопроводе, потерь и напряжения в обмотке статора. Сложность геометрической конструкции затрудняет использование встроенных в расчетную программу процедур поиска оптимальных параметров проектируемого устройства. Наличие ферромагнитных материалов в конструкции статора обуславливает сложную зависимость в распределении электромагнитных полей и источников тепла внутри оболочки. Анализ добавочных электрических потерь на краях обмотки статора привел к необходимости уменьшения размеров проводника из-за существенной неравномерности распределения тока. Выбор частоты напряжения произведен на основании анализа характера движения расплава под действием электромагнитных сил. Качественное перемешивание достигается при формировании крупных вихрей, захватывающих весь нижний слой расплава, что обеспечивается за счет увеличения длины статора. В режиме скачивания выгодно образование двух слоев в расплаве, движущихся навстречу друг другу. Проведенные расчеты показали линейную зависимость параметров линейного двигателя от соотношения ширины зубца и паза для области ненасыщенного железа магнитопровода.

Ключевые слова: статор, немагнитный ротор, экранирующий корпус, векторный магнитный потенциал, метод конечных элементов.

В конструкциях электродуговых печей часто применяются системы перемешивания расплава, которые решают две задачи: на этапе расплавления производится вертикальное перемешивание; на этапе удаления шлака производится горизонтальное перемещение для упрощения скачивания шлака. Дуговая печь от-

Певчев Владимир Павлович (д.т.н., доцент), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Стрижакова Елена Владимировна (к.т.н.), доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

Овсянников Владимир Николаевич (к.т.н.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

личается от других электротехнологических установок наличием механизма наклона для упрощения процессов слива шлака и расплавленного металла по окончании плавки. Это приводит к тому, что требуется обеспечить механическую прочность конструкции для предотвращения ее разрушения. Основными конструктивными элементами печи являются футеровка и теплоизоляция, выполненные из комбинации кирпичей и сыпучих материалов, скрепленных между собой. Для придания жесткости корпус печи помещается в стальной кожух. Общая толщина слоя теплоизоляции и футеровки составляет 0,5 м и более.

Тенденция развития дуговых печей, направленная на увеличение единичной мощности и сокращение времени плавки, отражена в большом количестве исследований и примеров практической реализации [1]. Задача интенсивного перемешивания расплава в мощных печах становится все более значимой. Для дуговых печей переменного тока характерно протекание токов, обеспечивающих создание электромагнитных сил в верхнем слое расплава. В печах постоянного тока такого эффекта не наблюдается. В обоих случаях требуется создание электродинамических сил, воздействующих на нижний слой металла, чтобы циркуляция охватила весь объем расплавленного металла.

В работе [2] методами физического и математического моделирования для печей емкостью от 0,5 до 25 т найдены соотношения между конструктивными характеристиками и электрическим режимом, определяющие скорость движения расплава. Исследование механизма возникновения в расплаве сил, обусловленных несимметричным расположением электродов, отражено в работе [3]. В ряде работ Ячикова И.М. [4–6] на основании моделирования токов и электромагнитных сил в системе «расплав – электрическая дуга» для печей постоянного тока определены факторы, влияющие на интенсивность перемешивания, а также изучено влияние конфигурации подового электрода и пятна дуги на мощность электровихревых течений.

Рассмотрение более широкого набора моделей при исследовании перемешивания расплава выполнено в работах [7–10]. Расчет электромагнитных сил в трехмерной области позволяет описать процессы формирования вихрей в жидком металле. Кроме решения электромагнитной, тепловой и гидродинамической задач и получения общей картины процессов, большой интерес представляют явления переноса примесей в расплавах. В работе [8] описано влияние неравномерности распределения джоулева тепла в расплаве на характер движения металла.

Положительный эффект от естественного электромагнитного перемешивания расплава в дуговой печи постоянного тока несомненен, однако в ряде случаев интенсивность этого процесса недостаточна.

Наиболее эффективное перемешивание расплава достигается размещением под основанием печи статора с катушками [11]. При этом в расплаве создается бегущее электромагнитное поле, приводящее к сложному движению слоев металла в трех направлениях в зависимости от высоты слоя. Конструкция устройства соответствует линейному асинхронному двигателю (ЛАД), имеющему статор, содержащий магнитопровод с многovitковыми катушками (рис. 1). Роль ротора играет расплав. Дополнительным элементом является стальной кожух печи, в котором наводятся токи, как и в расплаве, что приводит к дополнительному расходу электроэнергии. Несмотря на то, что данное решение давно используется на практике, широкому его применению препятствуют невысокие энергетические показатели и необходимость принятия мер к охлаждению статора

и защите его от неблагоприятной среды. Высокие температуры внутри печи не позволяют сделать зазор между статором и расплавом достаточно малым и совместить конструкции печи и статора, что отражается на энергетических характеристиках линейного двигателя и оптимальных размерах пазов и зубцов статора.

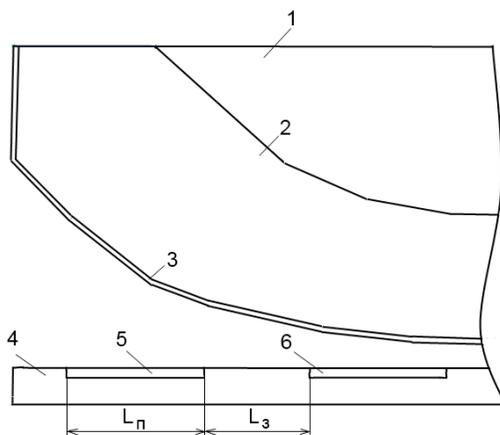


Рис. 1. Конструкция линейного асинхронного двигателя системы перемешивания расплава в дуговой печи:
1 – расплавленный металл; 2 – футеровка; 3 – корпус; 4 – магнитопровод статора;
5, 6 – катушки статорной обмотки

Конструкция печи содержит в верхней части сегменты зубчатых колес, которые в процессе наклона обеспечивают качение по горизонтальным стальным рейкам. Таким образом, печь не только наклоняется, но еще и перемещается в горизонтальном направлении. Форма основания кожуха сильно отличается от сферической или цилиндрической. Все эти особенности не позволяют применить криволинейную форму статора для уменьшения зазора между статором и кожухом. Выполнение моноблочной конструкции для печи и статора нецелесообразно по причине большого теплового потока через футеровку в окружающую среду. От печи тепло отводится с помощью обдува воздухом с большой скоростью. С вертикальной части кожуха иногда отвод тепла осуществляется с помощью накладываемых водоохлаждаемых пластин.

Проектирование линейного асинхронного электродвигателя для активного перемешивания металла в электродуговой печи заключается в определении его основных размеров и конструктивных параметров, таких как толщина магнитопровода, ширина паза и зубца, воздушный зазор между статором и кожухом печи, а также обмоточных данных и эксплуатационных характеристик. Также необходимо согласовать функционирование его с источником питания. С учетом изложенного целью работы является разработка конструкции и расчет параметров ЛАД для активного перемешивания расплава, обеспечивающего энергоэффективные режимы работы. Выполнение поставленной задачи ориентируется на применение современного программного обеспечения, реализующего численный метод расчета с использованием наиболее полного описания модели и свойств материалов.

При проектировании электрических машин в настоящее время используются численные методы, построенные на базе конечно-элементных или конечно-разностных моделей [12, 13], а также на основе схем замещения [14–16]. Первая

группа методов расчета позволяет найти распределение напряженности магнитного поля и токов во всех элементах электрической машины, определить интегральные параметры. В то же время моделирование динамических процессов, таких как разгон и торможение ротора, выгоднее проводить на моделях, построенных на основе упрощенных схем замещения. Рассмотрение расплава в качестве ротора асинхронной машины ставит новые задачи, обусловленные более сложным характером движения, пластичностью проводников вторичной цепи.

В отличие от обычных электрических машин в рассматриваемой задаче у кожуха и расплавленной стали относительная магнитная проницаемость близка к единице, что делает непростой процедуру выбора ширины паза и зубца магнитопровода. Решение этой задачи может быть достигнуто построением зависимостей мощности тепловыделения в расплаве и корпусе печи от соотношения размеров паза и зубца. Для выполнения этой процедуры вполне возможно обойтись решением двумерной электромагнитной задачи. Перейдя от системы уравнений Максвелла к формулировке с использованием векторного магнитного потенциала, можно записать дифференциальное уравнение с соответствующими граничными условиями

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) - j\omega g \mathbf{A} = -\mathbf{j}_{ext}; \quad \mathbf{A}|_L = 0.$$

Здесь \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал; μ_x, μ_y – относительная магнитная проницаемость материала по осям x, y ; j – мнимая единица; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота тока; g – удельная электрическая проводимость; L – граница расчетной области, \mathbf{j}_{ext} – вектор плотности стороннего тока.

На базе этих уравнений была реализована задача в конечно-элементной формулировке для плоской двумерной области. В качестве программной реализации использовался программный комплекс *Elcut*. В версиях начиная с 5.6 возможно решение нелинейной электромагнитной задачи, что позволяет корректно использовать *Elcut* для поставленной задачи. Конечная система уравнений имеет вид

$$[K] \cdot \{u\} = \{I\}.$$

Здесь $[K], \{I\}, \{U\}$ – матрица жесткости и векторы источников и неизвестных величин.

При решении задачи было принято допущение, что электропроводность элементов системы не зависит от времени и температуры. Магнитная проницаемость магнитопровода статора задавалась кривой намагничивания электротехнической стали. Зависимость ее от температуры также не учитывалась.

В результате решения системы уравнений было определено распределение индукции и магнитной напряженности в расчетной области, на основании которого производились вычисления локальных и интегральных параметров электродвигателя. Сила Лоренца, действующая на проводники с током, расположенные внутри объема интегрирования, рассчитывалась согласно выражению

$$\mathbf{F} = [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] dV.$$

В расплаве линии тока располагаются в поверхностном слое. С учетом криволинейной формы нижней области металла в ванне расчетные траектории ли-

ний тока переходят из одной плоскости в другую.

При решении задачи моделирования электромагнитных процессов в системе «статор – кожух – расплав» были приняты следующие параметры печи и ЛАД:

- высота расплава 660 мм;
- максимальный диаметр ванны расплава 2680 мм;
- число пазов статора 4;
- ширина статора 3800 мм;
- толщина магнитопровода статора 150 мм;
- минимальное расстояние между статором и кожухом печи 100 мм;
- минимальная суммарная толщина теплоизоляции и футеровки в нижней части 500 мм;
- толщина кожуха 10 мм.

Кожух печи выполнен из немагнитной стали с величиной удельной электропроводности $1250000 \text{ Сим} \cdot \text{м}$. В качестве загрузки печи принята сталь с проводимостью $1000000 \text{ Сим} \cdot \text{м}$; относительная магнитная проницаемость расплава равна единице.

Проведенные расчеты ориентированы на получение усилия, обеспечивающего перемещение слоя металла со скоростями, достаточными для хорошей циркуляции во всем объеме расплавленного металла с учетом области лобовых частей обмотки статора. Из практики создания подобных систем известно, что для рассматриваемой конструкции следует ориентироваться на силы 100–200 Н.

Варьирование размеров паза приводит к изменению числа витков и, соответственно, намагничивающей силы катушек. Сравнение характеристик двигателя в случае постоянства плотности тока в таком случае некорректно, поэтому сопоставление параметров двигателя при разных размерах пазов и зубцов проводилось для постоянной намагничивающей силы $I \cdot w = 178000 \text{ А}$. Среднее значение индукции в магнитопроводе при этом условии остается на одном уровне.

Выбор частоты тока производился с учетом толщины движущегося слоя. Задача состояла в обеспечении циркуляции во всем объеме расплава. Это возможно, если линии вихрей нижнего слоя способны замыкаться не только в горизонтальной плоскости, но и в вертикальной. Для реализации такого режима движения расплава необходимо глубину проникновения тока обеспечить не менее чем на половину высоты расплавленного металла.

Результаты расчетов представлены в табл. 1 и на рис. 2–4 в виде диаграмм. Для удобства некоторые численные значения пересчитаны в относительные. В качестве базовых величин при этом приняты значения каждого параметра, соответствующие минимальной ширине зубца:

- мощность тепловыделения в корпусе печи $P_K = 73 \text{ кВт}$;
- мощность тепловыделения в расплаве $P_P = 25,5 \text{ кВт}$;
- активная мощность двигателя $P_D = 143,7 \text{ кВт}$;
- напряжение на катушке $U = 1026 \text{ В}$;
- полная мощность двигателя $S = 3036 \text{ кВА}$;
- горизонтальная составляющая силы в расплаве $F = 274 \text{ Н}$.

В расчетах варьирование размеров пазов и катушек производилось при неизменной высоте и ширине проводников. Для принятой конструкции печи и высоты расплава найдено энергетически выгодное значение частоты тока, равное 5 Гц.

Проведенные расчеты показали нецелесообразность использования провод-

ников сечением больше $10 \times 20 \text{ мм}^2$, так как в противном случае на краях катушки увеличивается неравномерность распределения плотности тока в проводниках, что приводит к локальному перегреву.

В таблице приведено сравнение параметров ЛАД для семи вариантов соотношения ширины паза и зубца статора на основе результатов численного моделирования магнитного поля. На рис. 2–4 даны графические зависимости параметров ЛАД в функции ширины зубцов статора.

Изменение параметров ЛАД при варьировании ширины паза L_n и зубца L_3

№	L_n , м	L_3 , м	w	I , А	P_k , кВт	P_p , кВт	P_D , кВт	U , В	S , кВА	F_y , Н	F_x , Н	$\cos \varphi$	B , Тл
1	0,89	0,06	178	1000	55,1	21,5	112,2	1026	2052	1915	159	0,055	1,17
2	0,83	0,12	166	1072	58,4	22,2	118,6	1028	2204	1971	186	0,054	0,84
3	0,77	0,18	154	1156	61,6	23	125,6	1018	2353	2030	210	0,053	0,87
4	0,71	0,24	142	1254	64,6	23,7	132,7	1001	2511	2084	233	0,053	0,91
5	0,65	0,3	130	1369	67,5	24,3	140,2	976	2672	2132	255	0,052	0,94
6	0,59	0,36	118	1508	70,3	24,9	148,4	943	2844	2179	274	0,052	0,99
7	0,53	0,42	106	1679	73	25,5	143,7	904	3036	2223	293	0,047	1,03

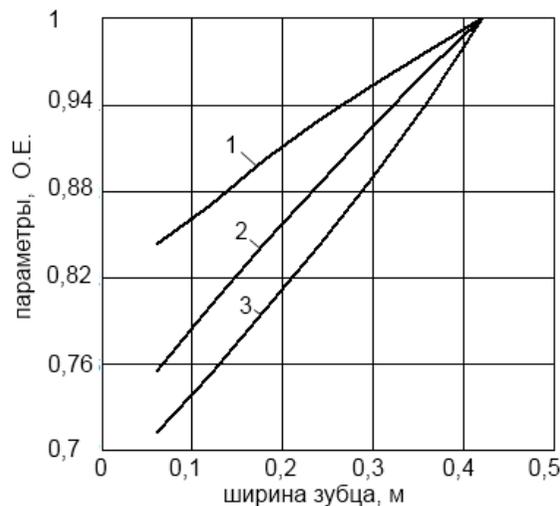


Рис. 2. Диаграммы изменения параметров линейного двигателя в функции ширины зубца:
 1 – мощность тепловыделения в расплаве; 2 – активная мощность ЛАД;
 3 – мощность тепловыделения в корпусе печи

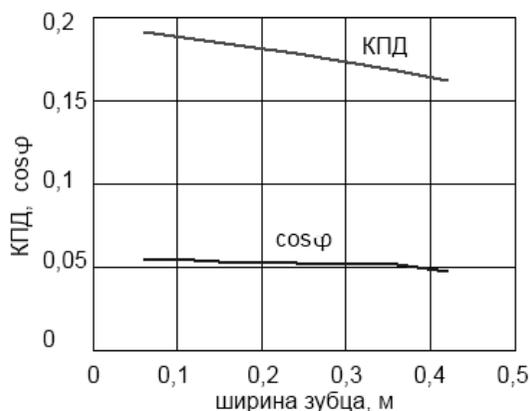


Рис. 3. Зависимость к.п.д. и коэффициента мощности линейного двигателя от ширины зубца

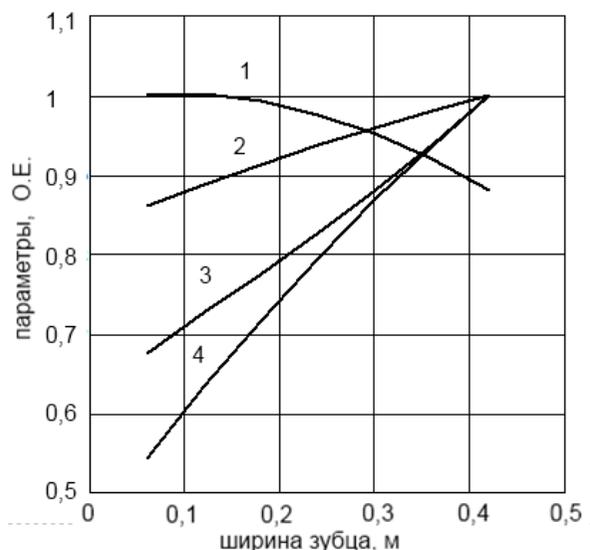


Рис. 4. Зависимость параметров линейного двигателя от ширины зубца:
 1 – напряжение катушки; 2 – вертикальная составляющая силы в расплаве;
 3 – полная мощность двигателя; 4 – горизонтальная составляющая силы в расплаве

Полученные диаграммы характеризуют сложную зависимость параметров от соотношения размеров паза и зубца. Потери тепла в проводниках статора, корпусе печи и расплаве (см. рис. 2) возрастают с увеличением ширины зубца и, соответственно, с уменьшением ширины паза. Монотонный характер изменения представленных диаграмм на рис. 2–4 объясняется ограничением пространства, в пределах которого отыскиваются интересующие параметры. Минимальный размер ширины зубца сопровождается максимальной величиной индукции. Дальнейшее уменьшение ширины зубца приводит к значительному снижению электромагнитной силы из-за насыщения магнитопровода, для компенсации которого требуется неоправданное увеличение тока. Полученные в ходе расчетов значения тока катушек статора соответствуют плотности тока от 5 до 8,5 А/мм².

Избыточное тепловыделение в данном случае может быть скомпенсировано водяным охлаждением с помощью трубок, проложенных в магнитопроводе. Более интенсивное тепловыделение потребует непосредственного охлаждения катушек, что достигается применением пустотелых проводников, через которые прокачивается охлаждающая жидкость. Такой вариант нежелателен из-за усложнения конструкции и повышения требований к качеству подготовки воды.

Результаты моделирования электромагнитных процессов в системе «статор – расплав» позволяют сделать несколько выводов, касающихся алгоритма поиска варианта, обеспечивающего заданное распределение электромагнитной силы:

1. Основная масса расчетов, связанная с поиском числа пазов, размеров паза и зубца, может осуществляться на базе двумерных моделей. На этом этапе предварительно определяются КПД и интегральные характеристики двигателя.

2. Анализ добавочных электрических потерь в крайних пазах обмотки статора показал, что увеличение размеров проводника свыше 10 мм по ширине и 20 мм по высоте приводит к недопустимым значениям местного перегрева для этих катушек.

3. Максимальные значения мощности тепловыделения в расплаве соответствуют для данной конструкции ширине зубца 0,42 м и ширине паза 0,53 м. Этому же соотношению соответствует и максимальная мощность тепловыделения в корпусе печи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Савин А.В., Никольский В.Е., Вохминцев Д.В.* Интенсификация плавки в дуговых сталеплавильных печах // Главный энергетик. – 2012. – № 7. – С. 45–48.
2. *Крутянский М.М., Нехамин С.М., Митрофанов М.В.* Электромагнитное перемешивание жидкого металла в дуговых печах постоянного тока // Электromеталлургия. – 2018. – № 4. – С. 2–12.
3. *Карпучек А.М., Макаров А.Н.* Исследование электромагнитной выталкивающей силы в дуговых сталеплавильных печах постоянного тока при несоосном расположении электродов // Энергосбережение в электро- и теплоэнергетических металлургических установках: Сб. науч.-практ. трудов. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2013. – С. 40–43.
4. *Ячиков И.М., Карандаева О.И., Ларина Т.П., Портнова И.В.* Моделирование электромагнитных процессов в электродуговых печах постоянного тока. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2005. – С. 139.
5. *Ячиков И.М., Ларина Т.П.* Оценка мощности перемешивания расплава в ванне дуговой печи постоянного тока под действием электровихревых течений / Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2016. – Т. 4. № 2. – С. 21–25.
6. *Ячиков И.М., Карандаева О.И., Ларина Т.П.* Моделирование электровихревых течений в ванне дуговой печи постоянного тока. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2008. – С. 234.
7. *Смирнов С.А., Калаев В.В., Нехамин С.М., Крутянский М.М., Колгатин С.Н., Нехамин И.С.* Математическое моделирование электромагнитного перемешивания жидкой стали в дуговой печи постоянного тока // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48. № 1. – С. 74–83.
8. *Казак О.В.* Влияние тепловых параметров на структуру и интенсивность вихревого движения расплава в дуговых печах постоянного тока // Инженерно-физический журнал. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2013. – Т. 86, № 6. – С. 1370–1378.
9. *Кабаков Д.Ю., Самохвалов С.Е., Питюк В.П.* Математическая модель гидродинамики и теплопереноса расплава стали при дуговом нагреве на установке ковш – печь // Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26. № 4. – С. 129–136.
10. *Кабаков Д.Ю., Самохвалов С.Е., Питюк В.П., Филатова О.А.* Моделирование гидродинамики и теплопереноса расплава стали при дуговом нагреве на установке ковш – печь // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 3 (43). – С. 33–37.

11. Масалов А.К., Кузьмин М.Г. Новая дуговая электропечь постоянного тока с управляемым электромагнитным перемешиванием расплава // Литейщик России. – 2017. – № 1. – С. 26–28.
12. Соломин В.А., Шаипал А.С., Трубицына Н.А., Савин Г.А., Трубицын М.А. Первичный продольный краевой эффект в линейных асинхронных двигателях с поперечным магнитным потоком // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 1 (61). – С. 121–126.
13. Андреева Е.Г. «Регулярный элемент» глобальной СЛАУ метода конечных элементов при моделировании электромагнитных процессов электротехнических устройств // Проблемы машиноведения: Мат-лы II Междунар. науч.-техн. конф. – Омск: Омский государственный технический университет, 2018. – С. 294–299.
14. 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.
15. Сарпулов Ф.Н., Ивануцкий С.В., Гоман В.В. Особенности моделирования линейных асинхронных двигателей с различными обмотками индуктора на основе детализированных схем замещения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 18–23.
16. Денисов В.Н., Курилин С.П. Инженерная модель линейного асинхронного двигателя // Электричество. – 2011. – № 3. – С. 52–54.

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2018 г.

CALCULATION OF PARAMETERS OF A LINEAR ASYNCHRONOUS MOTOR FOR A MELT MIXING SYSTEM

V.P. Pevchev, E.V. Strizhakova, V.N. Ovsyannikov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *A set of questions on the modeling of electromagnetic processes in a linear asynchronous motor, which is a system containing a stator winding, a steel furnace body and a molten metal, is considered. Effective mixing of the liquid metal is realized in a single-phase power supply mode of the stator winding. For the linear movement of the melt, which is required when slag is charged, two-phase voltage is used. The calculation of the controlled field of electromagnetic forces, providing the circulation and linear displacement regimes, was carried out numerically. The large gap between the stator and the melt and the presence of a steel shell between them lead to low values of efficiency and power factor. The search for a favorable relationship between the width of the groove and the tooth is made taking into account the restrictions on the allowable values of induction in the magnetic circuit, heat loss and voltage in the stator winding. The complexity of the geometric design makes it difficult to use the procedures built in the calculation program for finding the optimal parameters of the designed device. The presence of ferromagnetic materials in the stator design causes a complex relationship in the distribution of electromagnetic fields and heat sources inside the shell. Analysis of heat losses at the edges of the stator winding led to the need to reduce the size of the conductor due to the significant uneven distribution of current. The choice of the frequency of the voltage produced on the basis of a comparison of the nature of the movement of the melt under the action of electromagnetic forces. High-quality mixing is achieved when large vortices are formed that capture the entire lower layer of the melt, which is ensured by increasing the stator length. In the download mode, the formation of two layers in the melt, moving towards each other, is beneficial. The calculations showed a linear dependence of many parameters of a linear*

Vladimir P. Pevchev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Elena V. Strizhakova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Vladimir N. Ovsyannikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

motor on the ratio of the width of the tooth and the groove for the region of unsaturated iron of the magnetic circuit.

Keywords: stator, non-magnetic rotor, shielding case, vector magnetic potential, finite element method.

REFERENCES

1. Savin A.V., Nikolskiy V.E., Vokhmintsev D.V. Intensification of melting in arc steelmaking furnaces / *Glavnyy energetik* 2012. – no. 7. pp. 45–48.
2. Krutyanskiy M.M., Nekhamin S.M., Mitrofanov M.V. Electromagnetic Mixing of Liquid Metal in DC Arc Currents / *Elektrometallurgiya*. 2018. no. 4 pp. 2–12.
3. Karpuchek A.M., Makarov A.N. Investigation of the electromagnetic buoyancy force in arc steel smelting furnaces of direct current with misaligned arrangement of electrodes / *Energosberegeniye v elektro- I teploenergeticheskikh metallurgicheskikh ustanovkakh Sbornik nauchno-prakticheskikh trudov*. Tverskoy gosudarstvennyy tekhnicheskoy universitet. Tver'. 2013. – pp. 40–43.
4. Yachikov I.M., Karandayeva O.I., Larina T.P. Modelirovaniye elektrovikhrevykh techeniy v vanne dugovoy pechi postoyannogo toka [Modeling of electro-vortex currents in a bath of a DC arc furnace]. *Magnitogorsk. Izdatel'stvo: Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskoy universitet im. G.I. Nosova*. – p. 234.
5. Yachikov I.M., Larina T.P. Estimation of the mixing power of the melt in the bath of an arc furnace of a direct current under the influence of electrovortex currents / *Matematicheskoye I programmnoye obespecheniye system v promyshlennoy I sotsial'noy sferakh*. 2016. – vol. 4. No. 2. – pp. 21–25.
6. Yachikov I.M., Portnova I.V. Mathematical model of heat transfer in a bath of a DC arc furnace with electroworming mixing of a melt / *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy. Trudy Tret'yey mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Izdatel'stvo: Chelyabinskiy gosudarstvennyy universitet (Chelyabinsk). 2014. - pp. 55-57.
7. Smirnov S.A., Kalayev V.V., Nekhamin S.M., Krutyanskiy M.M., Kolgatin S.M., Nekhamin I.S. Mathematical modeling of electromagnetic stirring of liquid steel in a DC arc furnace / *Teplofizika vysokikh temperature*. 2010. – vol. 48. No. 1. - pp. 74-83.
8. Kazak O.V. Influence of thermal parameters on structure and intensity of vortex motion of a melt in DC arc furnaces / *Ingenerno-fizicheskoy gurnal*. Izdatel'stvo: Institut teplo- massoobmena im. A.V. Lykova NAN Belarusi (Minsk). 2013. - vol. 86. No. 6. – pp. 1370-1378.
9. Kabakov D.Y., Samokhvalov S.E., Piptyuk V.P. Mathematical model of hydrodynamics and heat transfer of steel melt with arc heating in a ladle furnace plant / *Matematicheskoye modelirovaniye*. 2014. - vol. 26. No. 4. - pp. 129-136.
10. Kabakov D.Y., Samokhvalov S.E., Piptyuk V.P., Filatova O.A. Modeling of hydrodynamics and heat transfer of steel melt with arc heating at a ladle furnace installation / *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2013. – no.3 (43). - pp. 33-37.
11. Masalov A.K., Kuz'min M.G. Novaya dugovaya elektropech postoyannogo toka s upravlyayemym elektromagnitnym peremeshivaniyem rasplava [New DC electric arc furnace with controlled electromagnetic stirring of the melt] / *Liiitttayschik Rossii*. 2017. - no. 1. - pp. 26-28.
12. Solomin V.A., Shashpal A.S., Trubitsina N.A. Savin A.G., Trubitsin M.A. Primary longitudinal edge effect in linear asynchronous motors with transverse magnetic flux / *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universitete putey soobsheniya*. – 2016. –nn. 1 (61) pp. 121-126.
13. Andreeva Ye.G. "Regular element" of the global SLAE finite element method in modeling electromagnetic processes of electrical devices / *Problemy mashinovedeniya. Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Ministerstvo obrazovaniya I nauki Rossii, Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskoy universitet; 2018 Izdatel'stvo: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskoy universitet (Omsk). 2018. – pp. 294-299.
14. Sarapulov F.N., Frizen V.N., Shvydkiy Ye.L., Smol'yanov I.A. Mathematical modeling of a linear asynchronous motor based on detailed replacement schemes / *Elektrokhnika*. 2018. – no. 4. -pp. 58-63.
15. Sarapulov F.N., Ivanitskiy S.V., Goman V.V. Features of simulation of linear induction motors with different inductor windings on the basis of detailed replacement schemes / *Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. 2009. – no. 5. - pp. 18-23.
16. Denisov V.N., Kurilin S.P. Engineering model of linear induction motor / *Elektrichestvo*. 2011. – no. 3. - pp. 52-54.