

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПЛОСКИХ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ МАШИН МЕТАЛЛУРГИЧЕСКО-
ГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Горемыкин В. А., Хацаюк М. Ю., Авдулов А. А.
Научный руководитель – доцент Головенко Е. А.
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск**

В настоящее время большинство потребителей продукции металлургических предприятий предъявляют все более высокие требования к качеству производимой продукции, но при этом предпочтение отдается продукции с меньшей стоимостью. Повышение качества продукции металлургических предприятий и снижение ее себестоимости приобретает также особую актуальность в связи с усилением жесткой конкуренции со стороны западных компаний. Таким образом, одним из основных путей решения данной проблемы является создание высокопроизводительных электротехнологических устройств, которые полностью удовлетворяют техническим и эксплуатационным требованиям металлургического производства и при этом имеют минимальную стоимость для производства и эксплуатации. Одним из перспективных направлений развития технологии производства металлов и сплавов является метод бесконтактного силового воздействия электромагнитного поля (ЭМП) на жидкометаллические среды. В данной работе была предпринята попытка исследования одной из конструкций машин работающей на данном принципе — плоской линейной индукционной машины (ЛИМ).

Основной областью применения ЛИМ с повышенным немагнитным зазором является металлургия. Металлургическое назначение ЛИМ определяет большую величину немагнитного зазора, что вызвано необходимостью размещения между индуктором и жидкометаллическим рабочим телом теплоизоляции. Большие немагнитные зазоры приводят к существенным конструктивным особенностям плоских ЛИМ. В частности ЛИМ металлургического назначения имеют большие абсолютные величины полюсного шага и как следствие малое число полюсов. Это в свою очередь вызывает значительные проявления поперечного и продольного краевых эффектов, а также сильное влияние на работу машины эффекта переноса мощности между фазами, при этом величина пульсирующего магнитного поля сопоставима с величиной бегущего магнитного поля.

Использование классических инженерных методик расчета плоских ЛИМ с увеличенным немагнитным зазором, основанных на аналитических выражениях, приводит к существенным погрешностям расчета (свыше 50%). Однако тяжелые условия эксплуатации ЛИМ металлургического назначения предъявляют строгие требования к работе в условиях производства как точки зрения надежности, так и технологической и энергетической эффективности. Создание новых и совершенствование известных конструкций ЛИМ металлургического назначения требует глубокого знания физических процессов протекающих в системе «ЛИМ – рабочее тело». Поэтому появляется необходимость применения современных методов численного математического моделирования с использованием коммерческих пакетов и методов проведения физического эксперимента.

Расчет задачи в нашем случае производился в коммерческом программном пакете ANSYS Multiphysics, который представляет собой многоцелевой конечно-элементный комплекс позволяющий решать задачи прочности, теплообмена, электромагнетизма, как по отдельности, так и совместно.

Конструкция индуктора ЛИМ состоит из ферромагнитного сердечника, собранного из листов электротехнической стали и многофазной обмотки, расположенной в пазах сердечника. Обычно применяют трехфазные обмотки, аналогичные обмоткам нормаль-

ных асинхронных машин. При питании плоской ЛИМ переменным током в зазоре между сердечниками рабочим телом возникает бегущее магнитное поле, подобное вращающемуся полю асинхронной электрической машины. Бегущее магнитное поле индуцирует в металле токи, и в результате протекания которых возникают электромагнитные силы, действующие на частицы металла. Под действием этих сил в металле развивается усилие, и он приходит в движение.

В данной работе процессы в плоской ЛИМ рассмотрены на примере трехфазного, трехобмоточного индуктора с плоскими катушками вокруг зубца рис. 1 и рис.2. Данная машина является частным случаем машины Шербиуса. Таким образом, представленная машина малополюсная и может иметь полюсный шаг $\tau = l_1$ при схеме питания АУС и $\tau = l_1/2$ при схеме АВС см. табл. 1.

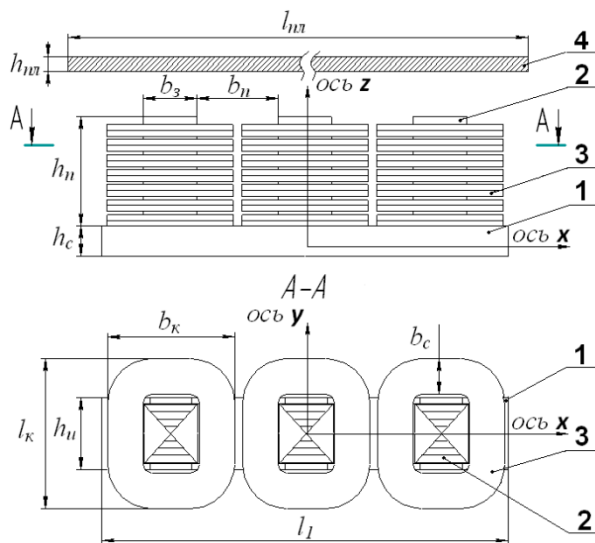


Рис.1. Конструкция ЛИМ



Рис. 2. Общий вид физической модели плоской ЛИМ

1 – спинка магнитопровода; 2 – зубец магнитопровода; 3 – катушки индуктора; 4 – алюминиевая пластина

Табл. 1. Схемы питания ЛИМ

Обозн.	Фаза тока на катушке в пазу обмотки		
	Катушка №1	Катушка №2	Катушка №3
<i>ABC</i>	0	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3}$
<i>AУС</i>	0	$\frac{5\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3}$

При численном математическом моделировании плоских ЛИМ, наиболее полную картину физических процессов в различных зонах электромагнитной системы может дать только трехмерная математическая модель. Именно путем трехмерного анализа

можно получить наиболее корректные и надежные рекомендации для оптимального проектирования подобных устройств.

Расчетная модель представлена на рис. 3, включает в себя следующие элементы: магнитопровод (1), обмотки индуктора (2), пластина (3), вокруг элементов 1÷3 воздушное пространство.

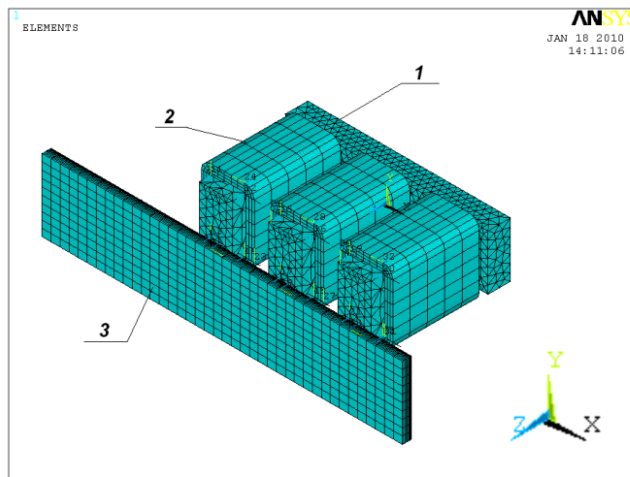


Рис. 3. Расчетная модель

Электромагнитное поле в расчетной области описывается системой уравнений:

$$\text{grad div } \bar{A} - \nabla^2 \bar{A} = \mu_a \bar{\delta} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} - \text{grad} \frac{1}{v^2} \frac{\partial \phi}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\text{div } \bar{\delta} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (2)$$

где $\bar{\delta} = -\gamma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \gamma \text{grad } \phi + \bar{v} \times \gamma \text{rot } \bar{A}$ – вектор плотности полного тока, $A/\text{мм}^2$;

\bar{A} – векторный потенциал $\frac{B \cdot c}{m}$; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость;

$v = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_a \mu_a}}$; ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость; ϕ – скалярный потенциал неподвижных зарядов; γ – удельная электрическая проводимость; \bar{v} – вектор скорости движения элементарного объема жидкого металла.

При оптимальном выборе конструктивных решений принималась задача максимизации тангенсальной составляющей F_τ , что определяет величину электромагнитного напора ЛИМ. При использовании плоской ЛИМ в качестве МГД-перемешивателя весьма важным является задача сокращения нормальной составляющей F_n , чтобы сократить эффект отталкивания немагнитного материала от ЛИМ с бегущим полем, который зачастую приводит к усилению восходящих гидродинамических потоков и разрушению оксидной пленки на поверхности расплава. В случае исследования ЛИМ в качестве МГД-перемешивателя кроме F_τ в качестве целевой функции применялось также повышение параметра F_τ/F_n .

Помимо математического моделирования было проведено также физическое моделирование с применением современных средств измерения и обработки данных фирмы National Instruments.

Ниже приведены основные результаты, которые были получены в результате проведения физического и математического моделирования.

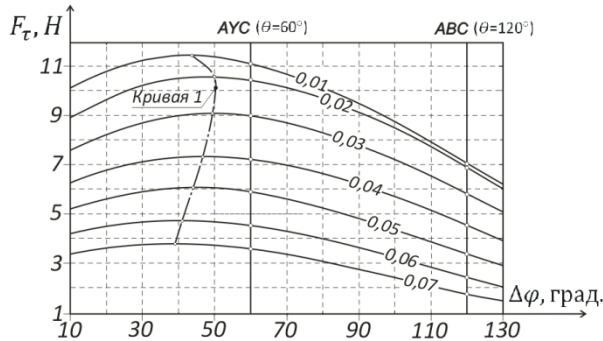


Рис. 4. Зависимость тангенсальной составляющей силы F_t от разности фаз $\Delta\phi$ на разных немагнитных зазорах Δ (от 0,01м до 0,07 м)

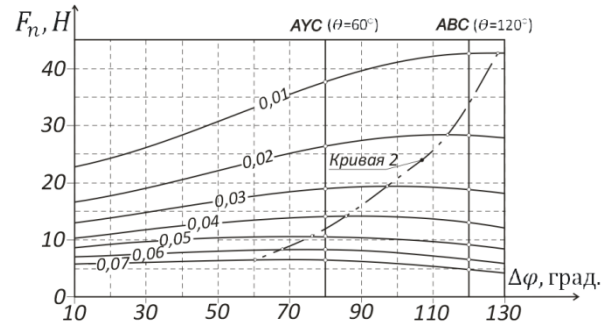


Рис. 5. Зависимость нормальной составляющей силы F_n от разности фаз $\Delta\phi$ на разных немагнитных зазорах Δ (от 0,01м до 0,07 м)

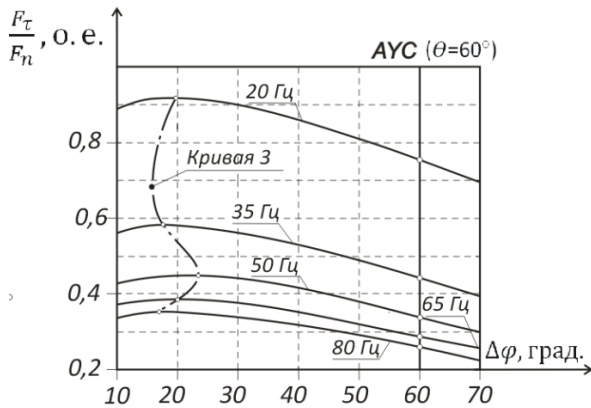


Рис. 6. Зависимость F_t/F_n от $\Delta\phi$ на разных немагнитных зазорах ($\Delta=0,01\text{м}$)

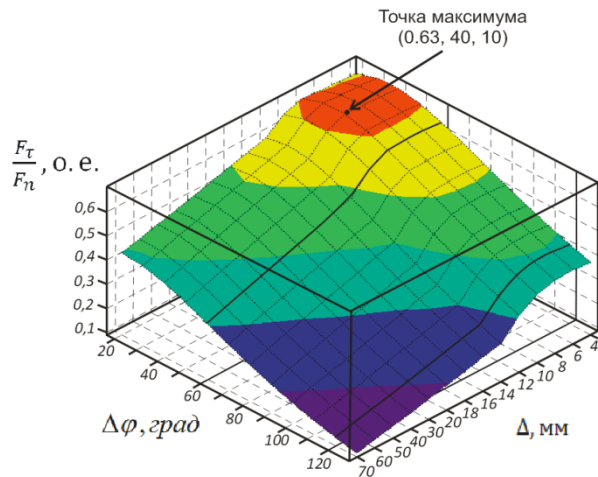


Рис. 7. Поверхность F_t/F_n от Δ и $\Delta\phi$ на частоте $f=50\text{ Гц}$

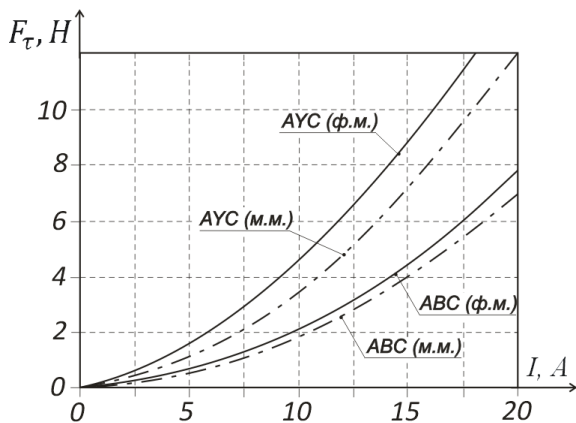


Рис. 8. Зависимость тангенсальной составляющей силы F_t от величины тока I для физической и математической моделей на немагнитном зазоре $\Delta=0,01\text{м}$ и частоте $f=50\text{ Гц}$

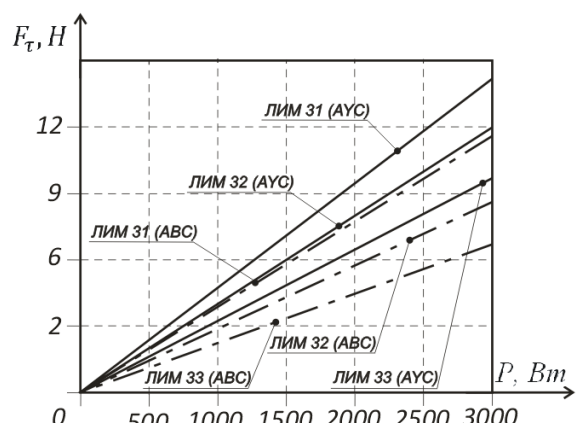


Рис. 9. Зависимость тангенсальной составляющей силы F_t от потребляемой активной мощности P для физической модели на немагнитном зазоре $\Delta=0,01\text{м}$ и частоте $f=50\text{ Гц}$