

Дудник М.З.

Донецкий национальный технический университет

Бондаренко В.И.

Славянский государственный педагогический институт

In the article considered are the simulation criterions of physical and geometrical parameters of the linear induction motors at physical simulation of them, shown are the examples of usade of physical models of such motors at the condition of incomplete similarity of them to the principal object for investigation of singl processes or characteristics.

К настоящему времени разработаны различные математические модели, обеспечивающие анализ сложных электромагнитных процессов в линейных асинхронных двигателях (ЛАД) как численными, так и аналитическими методами. Экспериментальная проверка результатов расчета осуществляется на натуральных образцах или физических моделях. Между тем вопросы физического моделирования ЛАД не нашли достаточного освещения в технической литературе. Поэтому в статье поставлена задача выявить возможности использования известных положений теории подобия при создании физических моделей ЛАД.

Метод моделирования основан на теории подобия, которая базируется на трех основных теоремах и дополнительных положениях к ним [1].

Подобию во всех его видах свойственны некоторые общие закономерности, которые принято называть первой и второй теоремами подобия. Теоремы устанавливают соотношения между параметрами подобных явлений, не указывая способов реализации подобия при построении моделей. Ответ на последний вопрос дает третья теорема подобия она определяет условия, необходимые и достаточные для того, чтобы явления оказались подобными.

Моделирование вращающихся электрических машин и их подобие рассматриваются в литературе, в списке которой выделим монографию [2]. В ней метод физического моделирования электрических машин углубленно развит, обобщен опыт его применения к исследованию индуктивных машин различных типов, в том числе с поступательно перемещающимися подвижными частями.

В последующих работах [3,4] эти вопросы частично освещены.

В приложении к рассматриваемым здесь машинам полезны рекомендации уже цитируемой работы [2] относительно моделирования электромагнитного поля в массивном или омедненном роторе асинхронного двигателя, возможности неподобного сокращения длины (для ЛАД - ширины) магнитного сердечника машины, а также расчета магнитного поля и потерь в плоских или цилиндрических проводящих слоях, расположенных в немагнитном зазоре между двумя поверхностями ферромагнитных тел с большой магнитной проницаемостью.

Из теоретических работ, где успешно применяется теория подобия, можно указать монографию [5], в которой использованы положения π -теоремы, утверждающей, что зависимость между n разными физическими величинами может быть сведена к $n-k$ зависимостям между безразмерными комплексами, составленными из упомянутых величин, если k - число независимых переменных в системе единиц.

Изложенные ниже результаты физического моделирования ЛАД следует рассматривать как один из возможных подходов к этому сложному вопросу.

Если связать все линейные размеры модели l со сходственными размерами оригинала L соотношением

$$l = m_L \cdot L,$$

где m_L - масштаб линейных размеров,

то соотношения между масштабами других величин можно установить путем сопоставления сходственных уравнений Максвелла, записанных для модели и оригинала.

Для нахождения масштабов изменения величин оригинала, обеспечивающих подобие сходственных процессов в физической модели, воспользуемся известным выражением ее добротности [6].

$$\varepsilon = \frac{2\pi f_1 \mu_0}{\alpha^2 \rho_S \delta' K_L}$$

где f_1 - частота сети;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м};$$

$$\alpha = \pi / \tau;$$

τ - полюсное деление;

$\rho_S = \rho_2 / \Delta_2$ - удельное поверхностное сопротивление вторичного элемента ЛАД толщиной Δ_2 ;

ρ_2 - удельное сопротивление его материала;

δ' - приведенный немагнитный зазор;

$K_{ЛЛ}$ - коэффициент, учитывающий влияние поперечного краевого эффекта.

Добротность ε величина безразмерная. Поэтому будет вполне естественным поставить условие, чтобы добротность модели ЛАД была такой же, как оригинала, т.е. $\varepsilon_M = \varepsilon_{OP}$.

Если изготовить модель и оригинал из одинаковых материалов, обладающих в сходственных элементарных объемах и в сходственных направлениях одними и теми же физическими свойствами, то можно найти соотношения между масштабами величин характеризующих электромагнитные процессы в элементарном объеме, и масштабом линейных размеров:

$$m_I = m_L^2; \quad m_H = 1; \quad m_i = 1/m_L; \quad m_\mu = 1;$$

После подстановки значений

$$\alpha_M = \frac{\pi}{\tau_M} = \frac{\pi}{m_L \tau_{OP}}; \quad \rho_S = \frac{\rho_2}{\Delta_{2M}} = \frac{\rho_2}{\Delta_{2OP} m_L}, \quad \delta'_M = \delta'_{OP} m_L$$

в равенство $\varepsilon_M = \varepsilon_{OP}$ и сокращения получим

$$f_M = \frac{f_{OP}}{m_L^2}.$$

Отсюда следует, что если изменять воздушный зазор δ' прямо пропорционально масштабу линейных размеров m_L , то частоту тока в обмотке двигателя необходимо изменить обратно пропорционально масштабу линейных размеров. В случае применения одинаковых материалов в модели и оригинале напряженности магнитного поля в сходственных точках окажутся одинаковыми.

При определении масштабов интегральных величин тока

$$I = \int_S J_n ds,$$

магнитного напряжения

$$F = \int_l H_l dl,$$

магнитного потока

$$\Phi = \int_S B_n ds,$$

напряжения

$$U = \int_l E_l dl$$

и некоторых других величин следует исходить из того, что интегрирование в модели и оригинале производится по сходственным объемам, поверхностям и линиям [1].

С учетом изложенного соотношения параметров оригинала и модели ЛАД представлено в табл. 1.

Весьма полезным оказались модели протяженных систем с приводом от линейных асинхронных двигателей, таких как транспортные рольганги, конвейерные поезда и т.п. Создание физических моделей таких установок для отработки способов и испытания средств управления процессами транспортирования объектов с эстафетной передачей их от одного двигателя к другому способствует значительному сокращению расходов при разработке рабочих проектов. При этом желательно сохранить подобие уравнений движения модели и оригинала

$$F_T = F_{CT} + m \frac{dv}{dt}$$

где F_T - тяговое усилие, создаваемое линейным двигателем;

F_{CT} - силы статического сопротивления движению перемещаемого объекта;

m - масса перемещаемого объекта;

v - скорость перемещения.

Таблица 1 - Соотношение параметров модели и оригинала ЛАД

Параметр	Оригинал	Модель	Соотношение параметров
l	2	3	4
Длина	L	l	$l = m_L \cdot L$
Время	T	t	$t = m_L \cdot T$
Напряженность магнитного поля	H	h	$h = H$
Индукция магнитного поля	B	b	$b = B$
ток	I	i	$i = m_L \cdot I$
частота	f_{OP}	f_M	$f_M = m_L^{-2} \cdot f_{OP}$
скорость	V	v	$v = m_L^{-1} \cdot V$
напряжение	U	u	$u = m_U \cdot U$
полное сопротивление	Z_{OP}	Z_M	$Z_M = m_L^{-1} \cdot Z$
усилие	F_T	f_T	$f_T = m_L^2 \cdot F_T$
мощность и потери	P	p	$p = m_L \cdot P$
К П Д	N	η	$\eta = N$
коэффициент мощности	COS Φ	COS ϕ	COS $\phi = \text{COS } \Phi$
температура	Θ		$= \Theta$

Здесь следует учитывать то обстоятельство, что при соблюдении критериев подобия масса вторичного элемента (объекта перемещения) изменяется пропорционально m_L^3 , а усилие пропорционально

m_L^2 . Если же принять во внимание, что реально масса перемещаемых объектов может изменяться, то условие соразмерности окажется не столь обязательным.

На основании изложенного была спроектирована и создана модель рольганга для перемещения стальных труб в процессе их изготовления. Масштаб m_L был принят равным 1/5. Однако в отношении воздушного зазора этот масштаб оказался невыполнимым, поэтому пришлось принять $m_S = 1/2$.

Опыт свидетельствует, что в двигателе с двухсторонним индуктором и вторичным элементом в виде медной или алюминиевой полосы, а также в двигателе с составным вторичным элементом при создании физической модели не всегда удается выполнить масштабирование немагнитного зазора согласно масштабу линейных размеров по техническим причинам. Это препятствует достижению полного подобия.

Анализ показывает, что создание универсальной модели ЛАД, как и вращающейся электрической машины практически невозможно [1,6]. Это заставляет исследователей прибегать к неполному моделированию, при котором подобие менее существенных в данном исследовании процессов нарушается. Такие модели используются для преимущественного изучения определенных параметров.

Например, для изучения краевых эффектов, влияния полносности на характеристики ЛАД и т.д.

Так, при изучении силового воздействия бегущего магнитного поля на расплавленный металл в работах [7,8] используется металлическая пластина.

Весьма полезны модели протяженных систем с приводом от ЛАД, таких как рольганги, конвейерные поезда и т.п. Они позволяют исследовать принципы управления ЛАД в устройствах с эстафетной передачей объекта перемещения, режимы работы двигателей. Опыт показал, что для исследования характеристик ЛАД более приемлемой является модель с дисковым вторичным элементом, на периферии которого располагаются индукторы ЛАД. При большом диаметре диска (2,5...3 м) его периферийную часть можно рассматривать как линейную.

Выводы: 1. Установлены соотношения оригинала ЛАД и его модели при физическом моделировании в условиях полного подобия.

2. Приведены рекомендации по использованию физических моделей для исследования отдельных явлений или характеристик ЛАД в случае невозможности обеспечить полное подобие оригинала и модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. М., "Высш. Школа", 1976. - 479 с.
2. Иванов - Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. - М.: Энергия, 1969. - 304 с.
3. Козаченко Е.А. Линейные тяговые электродвигатели. - М.: Информэлектро, 1984. - 72 с.
4. ЭИ "Электрические машины и аппараты", 1975, № 45. Масштабное моделирование ЛАД (пер. с англ.).
5. Круминь Ю.К. Основы теории и расчета устройств с бегущим магнитным полем. - Рига: Знание, 1983. - 278 с.
6. Дудник М.З. Исследование и разработка ЛАД для транспортно-технологических установок. Доктор. диссертация...М.: МЭИ, 1990.
7. Охременко Н.М. Основы теории и проектирования линейных индукционных насосов для жидких металлов. - М.: Атомиздат, 1968. - с. 396.
8. Бондаренко В.І. Лінійний асинхронний двигун з модульною обмоткою для впливу на електропровідний рідкометалевий струмінь кристалізатора. Автореф. Канд. дис... Донецьк, ДонНТУ. - 2002.