

УДК 621.313.13

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКТОРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рымша В.В. , Радимов И.Н., Меркулов И.В.

Одной из тенденций современного электропривода, заключающейся в максимально возможном устранении промежуточных кинематических передач между электродвигателем и рабочим органом механизма, а в пределе – в объединении электродвигателя и рабочего органа в одном корпусе, является применение линейных электродвигателей [1].

В большинстве регулируемых электроприводов применяются линейные аналоги вращающихся электрических машин постоянного тока с постоянными магнитами (ПМ). Однако, выполнение линейной машины путем такой топологической трансформации, как «разрезание по осевой линии и развертка на плоскости» приводит к тому, что, либо обмотка якоря (ОЯ), либо ПМ должны находиться на протяженной неподвижной структуре. Как следствие, происходит существенный перерасход обмоточной меди или дорогостоящих ПМ. В этой ситуации экономически более целесообразным является применение индукторных линейных двигателей постоянного тока (ЛДПТ), у которых один из элементов (подвижный или неподвижный) не содержит обмоток либо ПМ [2]. Согласно [3] индукторной называется машина с двумя обмотками на статоре и зубчатым магнитопроводом ротора. Применительно к индукторным ЛДПТ обе обмотки (ОЯ и обмотка возбуждения (ОВ) – в случае электромагнитного возбуждения (рис.1,а), ОЯ и ПМ – в случае магнитоэлектрического возбуждения (рис. 1,б)) расположены на первичном элементе (ПЭ). Вторичный элемент (ВЭ) представляет собой выполненную определенным образом зубчатую ферромагнитную структуру, не содержащую обмоток или ПМ. Использование индукторных ЛДПТ с электромагнитным возбуждением позволяет избежать трудностей при реализации двухзонного регулирования скорости, присущих электродвигателям с ПМ. В то же время при применении индукторных ЛДПТ с ПМ обеспечивается необходимый в ряде электроприводов режим аварийного динамического торможения при исчезновении напряжения, что невозможно осуществить для двигателя с электромагнитным возбуждением.

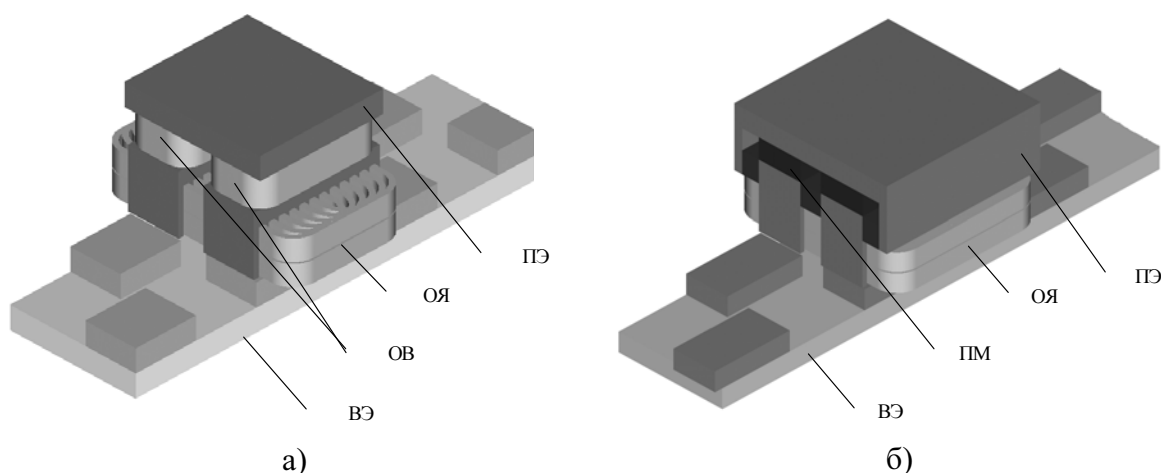


Рис. 1. Конструктивные исполнения индукторных ЛДПТ.

Электромеханическое преобразование энергии в индукторном ЛДПТ происходит, в основном, за счет изменения взаимоиндуктивности между неподвижными обмотками ПЭ при перемещении относительно них зубчатого магнитопровода ВЭ.

Расчет тягового усилия  $F_{\text{тяг}}$ , действующего на один из элементов индукторного ЛДПТ, содержащего две обмотки и перемещающегося вдоль координаты  $x$ , возможен на

основе выражения, описывающего процесс электромеханического преобразования энергии в индукторных машинах [3]:

$$F_{\text{тяг}} = \frac{I_B^2}{2} \frac{\Delta L_B}{\Delta x} + \frac{I_A^2}{2} \frac{\Delta L_A}{\Delta x} + I_B I_A \frac{\Delta L_{BA}}{\Delta x}, \quad (1)$$

где  $I_B$  - ток ОБ,  $I_A$  - ток ОЯ,  $L_B$  - индуктивность ОБ,  $L_A$  - индуктивность ОЯ,  $L_{BA}$  - взаимоииндуктивность обмоток возбуждения и якоря.

При этом вводятся следующие упрощающие допущения:

- нелинейная магнитная цепь заменена эквивалентной линейной, в которой насыщение учитывается коэффициентом насыщения  $K_{\mu}$ ;
- обмотка якоря заменена тонким токовым слоем, расположенным на поверхности магнитопровода якоря;
- зубчатость магнитопровода якоря учитывается коэффициентом Картера  $K_{\delta}$ ;
- не учитываются краевые эффекты;
- не учитывается коммутация тока в секциях обмотки якоря.

На основе выражения (1) и принятой системы допущений построены проектные математические модели индукторных ЛДПТ различных конструктивных исполнений в линейной постановке задачи [4]. Эти модели имеют определенные различия между собой, которые связаны с особенностями конструкции и организации путей замыкания основного магнитного потока. В то же время общими для всех математических моделей являются следующие основные компоненты:

- математическая модель для расчета геометрических размеров;
- математическая модель для расчета обмоточных данных;
- математическая модель для расчета магнитной цепи;
- математическая модель для расчета характеристики намагничивания;
- математическая модель для расчета рабочих характеристик;
- математическая модель для расчета параметров и постоянных времени;
- математическая модель для расчета тепловых процессов;
- математические модели проектных ограничений и целевых функций.

Полученные в такой постановке математические модели позволяют на предварительном этапе определить основные геометрические размеры индукторных ЛДПТ и приближенно, с учетом принятых допущений о характере распределения магнитного поля в двигателе, рассчитать характеристики и оценить его рабочие свойства. Принятые при разработке упрощенных моделей допущения позволяют получать удовлетворительные результаты при невысоких электромагнитных нагрузках, и, следовательно, низком уровне насыщения магнитной системы двигателя. С увеличением нелинейных эффектов происходит существенное снижение точности расчета. Уточнение разработанных математических моделей возможно путем применения современных численных методов расчета и анализа магнитного поля, в частности метода конечных элементов. Данный метод позволяет учесть реальную геометрию и достаточно высокий уровень насыщения ферромагнитных материалов, присущий рассматриваемым индукторным ЛДПТ.

В качестве типовой области расчета двумерного магнитного поля в индукторном ЛДПТ может быть принята топологическая модель (рис.2,а) [5].

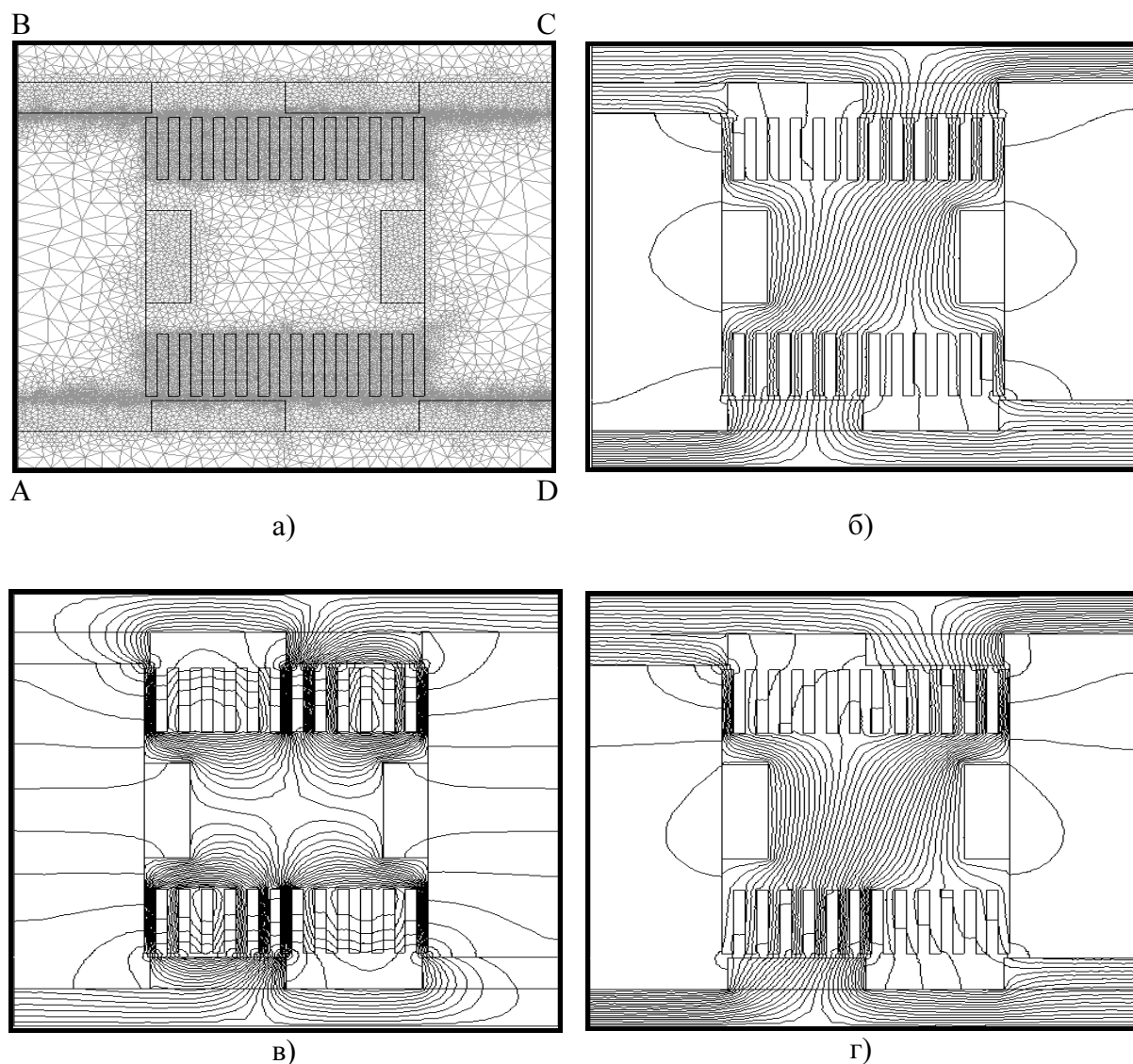


Рис. 2. Конечноэлементная аппроксимация и распределение магнитного поля в индукторном ЛДПТ.

На границах расчетной области заданы краевые условия Дирихле:  $A|_{AD} = A|_{BC} = 0$ ;  $A|_{AB} = -A|_{CD}$ . Такая топологическая модель является достаточно универсальной и может быть использована для расчета магнитного поля индукторных ЛДПТ односторонней и двухсторонней конструкции с различными геометрическими формами магнитопровода якоря. В данной постановке задачи область расчета разбита на 40000 конечных элементов с 20120 расчетными узлами. Распределение магнитного потока для поля возбуждения (б), поля якоря (в) и поля при нагрузке (г) показано на рис. 2.

Основной задачей при проектировании индукторных ЛДПТ является определение электромагнитных сил, действующих на магнитопровод при перемещении. Для оценки адекватности разработанной двумерной математической модели на основе результатов полевых расчетов был проведен расчет максимального  $F_{\text{тmax}}$  и минимального  $F_{\text{тmin}}$  тягового усилия индукторного ЛДПТ через тензор натяжений в магнитном поле. При исследовании принималось, что число полюсов двигателя  $2p = 4$ , ширина активной части  $l_{\delta} = 40\text{мм}$ , воздушный зазор  $\delta = 2\text{мм}$ , ток якоря  $I_a = 3,4\text{А}$ , ток возбуждения  $I_b = 1\text{А}$ . Результаты расчетов и их сравнение с результатами эксперимента сведены в табл. 1.

Таблица 1

Величина	Расчет	Эксперимент	Погрешность, %
$F_{m \max}$ , Н	28,74	25,8	11,4
$F_{m \min}$ , Н	22,82	20,4	11,86

Из представленных в табл. 1 данных следует, что погрешность расчета тягового усилия находится в пределах 12%, что связано с невозможностью учета в предложенной двухмерной модели реального, трехмерного характера распределения магнитного поля в индукторном ЛДПТ. Следовательно, повышение адекватности математической модели и уточнение расчетного значения тягового усилия возможно на основе трехмерного моделирования магнитного поля с учетом насыщения. Решение задачи в трехмерной нелинейной постановке осуществим для индукторного ЛДПТ с теми же геометрическими размерами, обмоточными данными и электромагнитными нагрузками, что и при двухмерном моделировании. Результаты моделирования при числе расчетных узлов 2533865 представлены на рис. 3 в виде распределения: магнитной индукции в индукторном ЛДПТ (рис. 3,а); магнитной индукции в воздушном зазоре индукторного ЛДПТ при  $I_a = 0A$ ,  $I_b = 1A$  (рис. 3,б); магнитной индукции в воздушном зазоре индукторного ЛДПТ при  $I_a = 3,4A$ ,  $I_b = 0A$  (рис. 3,в); магнитной индукции в воздушном зазоре индукторного ЛДПТ при  $I_a = 3,4A$ ,  $I_b = 1A$  (рис. 3,г).

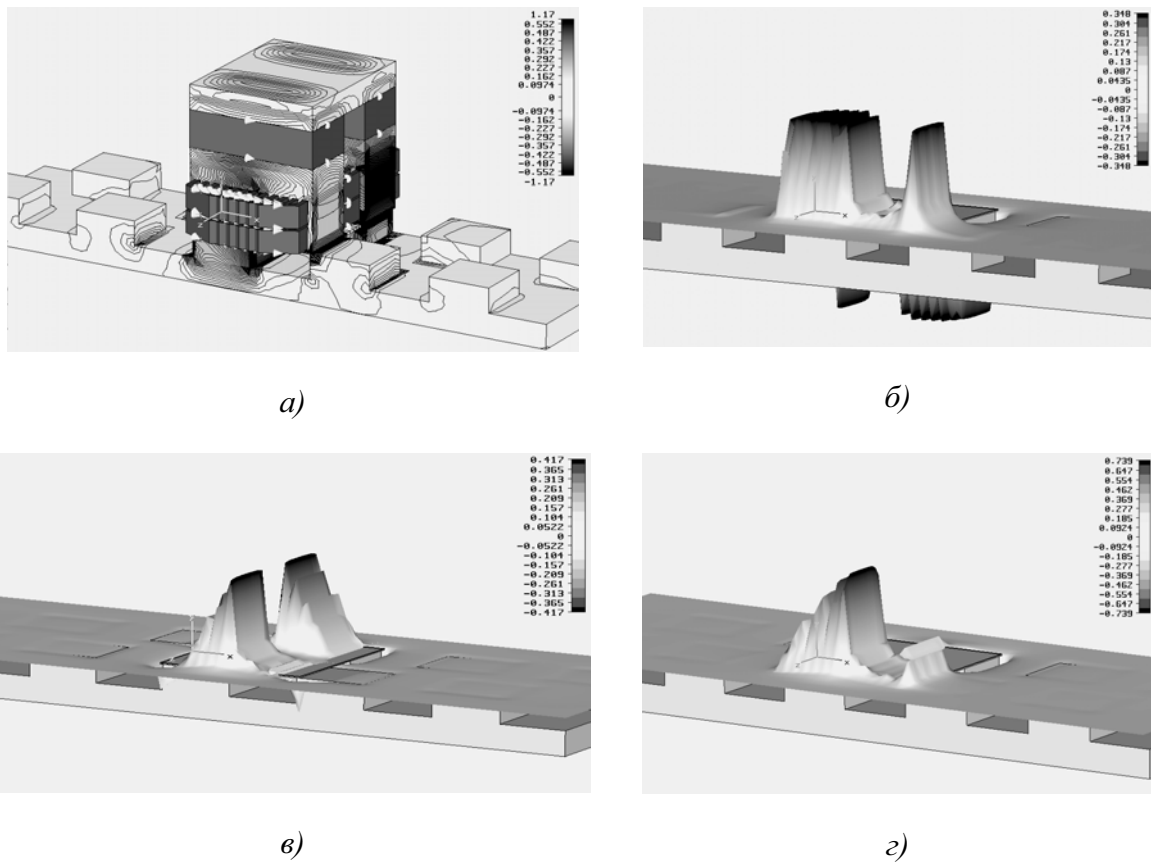


Рис. 3. Распределение трехмерного магнитного поля в индукторном ЛДПТ

Результаты расчета тягового усилия на основе трехмерной модели (3D) и сравнительный анализ с результатами двухмерного моделирования (2D) и экспериментом (Э) сведены в табл. 2.

Таблица 2

Величина	2D	3D	Э	Погрешность, %	
				2D – Э	3D – Э
$F_{m\max}, H$	28,74	27,6	25,8	11,4	7
$F_{m\min}, H$	22,82	21,9	20,4	11,86	7,3

Из данных табл. 2 следует, что решение трехмерной полевой задачи позволяет снизить погрешность в определении тягового усилия с 12% до 7% по сравнению с экспериментальными результатами. В то же время необходимость решения трехмерных задач в индукторных ЛДПТ должна быть строго обоснована с точки зрения ресурсных и временных затрат.

The main principles of the realization of the stage-by-stage approach to mathematical modeling of the inductor linear direct current motors are considered. The results of the modeling of distribution of a magnetic field and electromagnetic forces are present.

1. Мамалыга В.М. Практически важные задачи сбережения энергии, потребляемой машинами и механизмами с электроприводом, и принцип достаточности // Энергетика и электрификация. – 2000. - № 5. - С. 40-44.

2. Свечарник Д.В. Электрические машины непосредственного привода. – М., Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

4. Терзян А.А., Рымша В.В. Оптимальное проектирование линейных индукторных двигателей постоянного тока // Изв. ВУЗов. Сер. Электромеханика. - 1988. - № 3. - С. 42-50.

5. Терзян А.А., Рымша В.В., Меркулов И.В. Магнитное поле и электромагнитные силы в линейных индукторных двигателях постоянного тока // Изв. ВУЗов. Сер. Электромеханика. – 1991. - № 4. – С. 21-26.