

## СИЛОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ЛИНЕЙНОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Милых В.И., д.т.н.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические машины"  
тел. (0572) 707-65-14; e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua; сайт: http://users.kpi.kharkov.ua/kem/

Ткаченко С.В.

Открытое акционерное общество завод "Потенциал"  
Украина, 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 17  
тел. (0572) 99-81-88; e-mail: potencial@potencial.kharkov.com

*Розглянуті силові взаємодії в лінійному імпульсному електродинамічному двигуні для невибухових джерел сейсмоколиваль, що відрізняється циліндровою електромагнітною системою і її сильним насиченням. Виявлений внесок в загальну тягову силу складових електродинамічного і магнітного походження, а також характер зміни сил залежно від взаємного положення якоря і реактора і ще від МРС їхніх обмоток.*

*Рассмотрены силовые взаимодействия в линейном импульсном электродинамическом двигателе для невзрывных источников сейсмоколебаний, отличающемся цилиндрической электромагнитной системой и ее сильным насыщением. Выявлен вклад в общую тяговую силу составляющих электродинамического и магнитного происхождения, а также характер изменения сил в зависимости от взаимного положения якоря и реактора и еще от МДС их обмоток.*

### ВВЕДЕНИЕ

Линейный импульсный электродвигатель (ЛИЭД), являющийся рабочим органом импульсного электромеханического сейсмоисточника невзрывного характера [1-3], предназначенного для возбуждения в земной коре сейсмических колебаний при поиске нефти, газа и других полезных ископаемых, был представлен в [4-6].

Рассматриваемый ЛИЭД является короткоходным электромеханическим преобразователем и имеет цилиндрическую конструкцию, которая представлена на рис. 1.

Основными элементами двигателя являются порождающие силовое взаимодействие якорь и реактор. Якорь жестко связан с опорной плитой в виде конуса и может перемещаться лишь на весьма малое расстояние, равное упругой деформации грунта, - порядка нескольких миллиметров. Преобладающее же движение под действием развиваемого импульса силы осуществляет реактор в противоположную сторону - вверх. Ограничивает и демпфирует отскок реактора амортизатор. Таким образом, рабочее воздействие на грунт, вызывающее сейсмоколебания, оказывает силовая "отдача" якоря.

Активными электромагнитными элементами реактора и индуктора являются цилиндрические ферромагнитные сердечники с "коллекторной" шихтовкой, в пазах которых расположены секционированные кольцевые обмотки.

На рис.1 показано исходное положение реактора и чередующееся направление тока в обмотках, что обеспечивает заданное направление сил  $F_{em}$  в рабочем режиме при подаче импульса тока.

Мощные импульсы тока в обмотки подаются от емкостного накопителя энергии, который периодически заряжается от источника питания (синхронного генератора, аккумуляторов).

Одной из основных задач, которые решаются при проектировании представленного ЛИЭД, является обеспечение и соответствующий расчет основной силы взаимодействия якоря и реактора, а также ее распределения между обмотками и сердечниками. Основы расчета, которые представлялись в [4-5], построены на весьма упрощенных моделях магнитного поля, а также на некоторых данных, корректируемых по результатам экспериментов. Поэтому такой подход может быть целесообразен только на начальных этапах проектирования как первое приближение.

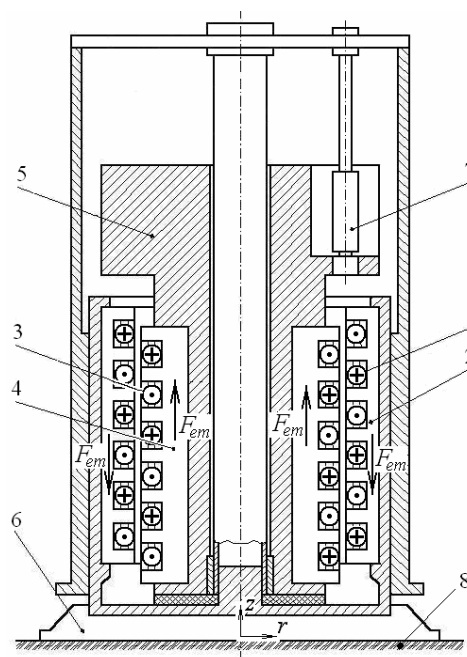


Рис. 1. Устройство линейного электродвигателя:  
1 – обмотка реактора; 2 – магнитопровод якоря; 3 – обмотка реактора; 4 – магнитопровод реактора; 5 – инертная масса; 6 – опорная плита-конус; 7 – амортизатор; 8 – грунт

Сложность решения задачи расчета силовых взаимодействий вызвана, прежде всего, очень сильным насыщением магнитопровода ЛИЭД, а также плохо прогнозируемой организацией магнитного поля при различных взаимных положениях якоря и реактора в процессе работы двигателя. Однако эти проблемы преодолеваются естественным, для современного уровня вычислительной техники, переходом от классических цепных моделей магнитного поля к численным полевым расчетам.

В связи с отмеченными обстоятельствами, целью данной работы является численно-полевой анализ силовых взаимодействий в ЛИЭД представленной конструкции. А для того, чтобы понимать место этого двигателя в области электрических машин, определим его в соответствии с [6], как электродинамический ЛИЭД с наружным якорем.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИЛ В ЛИЭД

Задача расчета силовых взаимодействий при численно-полевом подходе складывается из двух этапов: сначала рассчитывается магнитное поле с учетом реальной геометрии магнитной системы ЛИЭД и насыщения магнитопровода, а затем на этой основе определяются силовые взаимодействия, а именно силы, действующие непосредственно на обмотки, на магнитопровод и в целом на якорь и реактор.

Учитывая осевую симметрию магнитной системы ЛИЭД, к которой относим ферромагнитные сердечники и обмотки, трехмерное магнитное поле можно рассчитывать в меридиональной плоскости, проходящей через центральную ось симметрии (рис. 1). В обусловленной модели, варианты которой показаны на рис. 2, это поле описывается посредством тангенциальной составляющей векторного магнитного потенциала (ВМП)  $A_\varphi$  дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{\mu \cdot r} \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r} \right\} = -J_\varphi, \quad (1)$$

где  $r, z$  – радиальная и осевая координаты цилиндрической системы;  $J_\varphi$  – угловая составляющая плотности тока в обмотках (в данной постановке вихревыми токами в других элементах конструкции при импульсном возбуждении пренебрегаем);  $\mu$  – магнитная проницаемость.

При решении уравнения (1) в меридиональной плоскости  $(r, z)$  одной из границ является центральная ось. Прочие границы при численном расчете магнитного поля должны иметь конкретную позицию и выноситься за пределы активной зоны на такое расстояние, где магнитное поле можно считать пренебрежимо малым. В итоге на определенных границах  $\Gamma$  прямоугольной области можно было принять простейшее граничное условие Дирихле – в данном случае для ВМП:

$$A_{\varphi\Gamma} = 0. \quad (2)$$

В представленной формулировке для решения полевой задачи весьма эффективной является программа FEMM [7], которая обеспечивает численные

расчеты на основе метода конечных элементов. При его использовании геометрических искажений области расчета и входящих в нее элементов можно не допускать, а еще учитываются задаваемые кривые намагничивания ферромагнитных сердечников и их шихтовка (в любой координатной плоскости).

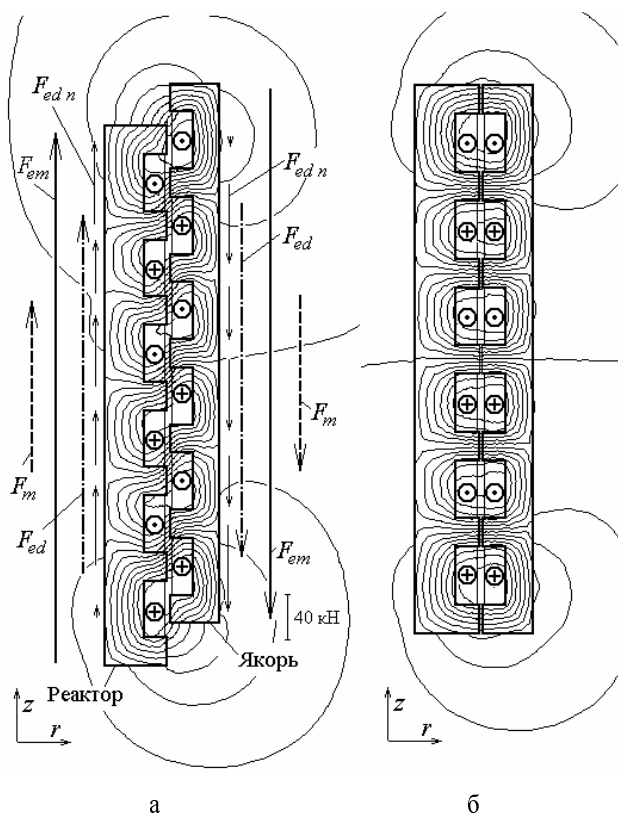


Рис. 2. Симметричные половины сечения магнитной системы ЛИЭД с вариантами расположения реактора: а – исходное положение; б – конечное положение

Как известно [8], полученное решение в виде распределения ВМП позволяет перейти к целому ряду электромагнитных параметров электрических машин.

В данном случае для анализа силовых взаимодействий в ЛИЭД будем использовать следующие виды сил.

Через тензор напряжения Максвелла определяется результирующая электромагнитная сила, взаимодействия реактора и якоря:

$$F_{em} = \frac{2\pi}{\mu_0} \int_{l_\delta} r B_r B_z dl. \quad (3)$$

Здесь  $B_r$  и  $B_z$  – радиальная и аксиальная составляющие магнитной индукции, а интегрирование проводится по контуру  $l_\delta$  в плоскости  $r, z$ , одна из сторон которого обязательно проходит по зазору по координате  $z$ , а остальная часть охватывает полностью сердечник с обмоткой. Это может быть реактор или якорь – результат должен быть одинаковым. Контур полностью проходит по неферромагнитному пространству, поэтому в формуле фигурирует магнитная постоянная  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Результирующая сила в осесимметричной систе-

ме имеет только аксиальную составляющую, т.е. силы  $F_{em}$  действуют на якорь и реактор встречно, как показано на рис.1 и рис.2.

Электродинамические усилия действуют непосредственно на токнесущие элементы – обмотки с током, и определяются базовой формулой на основе закона Ампера:

$$F_{ed} = 2\pi \int_{S_J} r J_{\phi} B_r dr dz, \quad (4)$$

где  $S_J$  – площадь интегрирования по сечению обмотки в одном пазу или во всех пазах – в зависимости от того, какая сила определяется.

Сила  $F_{ed}$ , как и  $F_{em}$ , приходится на весь конкретный кольцевой элемент и поэтому направлена по аксиальной оси ЛИЭД.

Если использовать силу  $F_{ed}$ , действующую на всю обмотку якоря или реактора, то можно получить магнитную силу, приложенную непосредственно к конкретному сердечнику:

$$F_m = F_{em} - F_{ed}. \quad (5)$$

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Перед тем, как представлять и анализировать силовые взаимодействия, приведем основные исходные параметры исследуемого ЛИЭД: внутренний диаметр сердечника реактора – 288 мм; наружный диаметр сердечника якоря – 512 мм; зазор – 2 мм; аксиальная длина сердечников – 533 мм; размеры пазов – 55×23 мм<sup>2</sup>; ширина зубцов – 29 мм.

Данный ЛИЭД рассчитан на импульс силы с максимумом, достигающим около 100 тонн. Соответственно было выявлено, что для этого необходим ток в обмотках, при котором МДС  $F_{En}$ , приходящаяся на паз, должна достигать порядка 100 кА. Поэтому при расчетах эта МДС варьировалась от 20 до 100 кА с шагом 20 кА.

Варьировалось также взаимное положение якоря и реактора. Крайние положения представлены на рис. 2: а – исходное положение (зубец против паза), обеспечивающее наибольшую силу; б – конечное положение (зубец против зубца), при котором тяговая сила отсутствует. В этих пределах реактор делает рабочий ход на 42 мм, а расчеты проводились для 8 положений, отличающихся сдвигом на  $\Delta z = 6$  мм.

При расчете магнитного поля программа FEMM сгенерировала конечно-элементную структуру, состоящую примерно из 24 тысяч узлов и 48 тысяч треугольников. Весьма малый фрагмент этой структуры в зоне зазора представлен на рис. 3.

Рассчитываемые магнитные поля частично представлены их картинами на симметричных половинах сечений магнитной системы ЛИЭД на рис. 2. По сути это линии равного магнитного потока  $rA_{\phi} = \text{const}$ , причем крайние значения в области расчета рис. 2,а при максимальной МДС  $F_{En}$  составляют -0,1528 и +0,1575 Вб. А магнитная индукция в этом варианте достигает в зубцах 2,85..2,97 Тл, в спинках сердечников – 1,9..2,7 Тл, в зазоре – 3,5 Тл. В модели рис. 2,б

при той же МДС крайние значения магнитного потока составляют -0,1671 и +0,1663 Вб. Магнитная индукция в зубцах и зазоре достигает порядка 4 Тл.

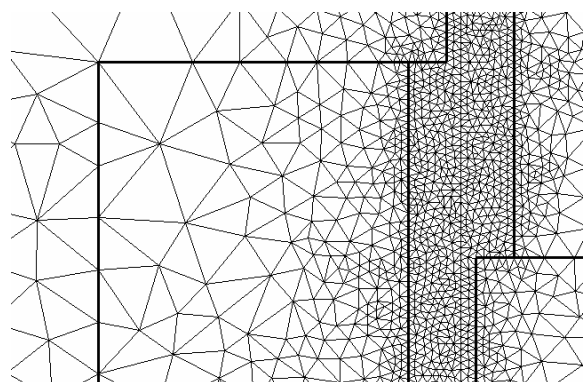


Рис. 3. Фрагмент конечно-элементной структуры

Более подробный анализ проведем, в соответствии с названной выше целью статьи, для различных сил, определенных формулами (3)-(5).

На рис. 2,а для данного расчетного варианта при  $F_{En} = 100$  кА векторами в указанном масштабе представлена целая совокупность сил. Электродинамические силы  $F_{edn}$  приходятся на часть обмотки, заключенную в каждом конкретном пазу (силы показаны напротив конкретных пазов якоря и реактора, но для удобства изображения вынесены за пределы сердечников). Обращает внимание то, что эти силы по пазам распределены неравномерно.

Показаны также векторы результирующих сил  $F_{em}$ ,  $F_{ed}$  и  $F_m$  по формулам (3)-(5), приходящиеся на реактор и индуктор (изображение с соответствующей стороны). Здесь очевидно, что в тяговую силу  $F_{em}$  основной вклад дает именно электродинамическая сила  $F_{ed}$ : отсюда и классификационный признак данного ЛИЭД - электродинамический. Сила  $F_m$  хотя и меньше, но, тем не менее, также дает заметный вклад в тяговую силу, и пренебречь этим нельзя. Известно, что в классических электрических машинах с менее насыщенными сердечниками (особенно – зубцами) все наоборот: подавляющее значение имеет сила типа  $F_m$ , а сила типа  $F_{ed}$  - несущественна.

Зависимости результирующих сил  $F_{em}$  и  $F_{ed}$  от взаимного положения реактора и якоря в пределах крайних, представленных на рис.2, даны на рис.4, причем для пяти представленных ранее значений МДС  $F_{En}$ , приходящейся на один их паз. Заметим, что при меньших значениях  $F_{En}$  и, соответственно меньших насыщениях магнитопровода, относительный вклад силы  $F_{ed}$  в тяговую силу  $F_{em}$  оказывается не столь существенным, как при максимальной МДС, т.е. при очень сильном насыщении.

Очевидно также, что при меньших насыщениях максимум силы  $F_{em}$  достигается не в крайнем положении индуктора, т.е. не при  $z=0$ .

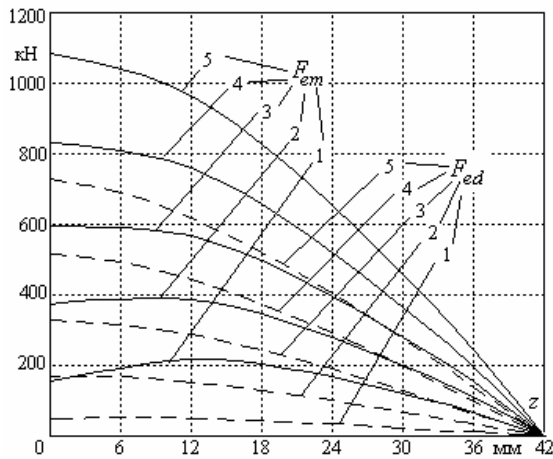


Рис. 4. Изменение результирующих сил  $F_{em}$  и  $F_{ed}$  при различных положениях реактора ( $z=0$  – исходное по рис. 2,а;  $z=42$  мм – конечное по рис. 2,б) и при разных значениях МДС  $F_{En}$ : 1 – 20 кА; 2 – 40 кА; 3 – 60 кА; 4 – 80 кА; 5 – 100 кА

Для более очевидной зависимости силового взаимодействия реактора и индуктора от МДС  $F_{En}$  на рис.5 представлены графики тяговой силы  $F_{em}$  в функции от этой МДС для указанных значений  $z$ . Эти зависимости приближаются к линейным, хотя при отсутствии быстро наступающего сильного насыщения и, тем более, при ненасыщенном магнитопроводе характер графиков напоминает бы параболу.

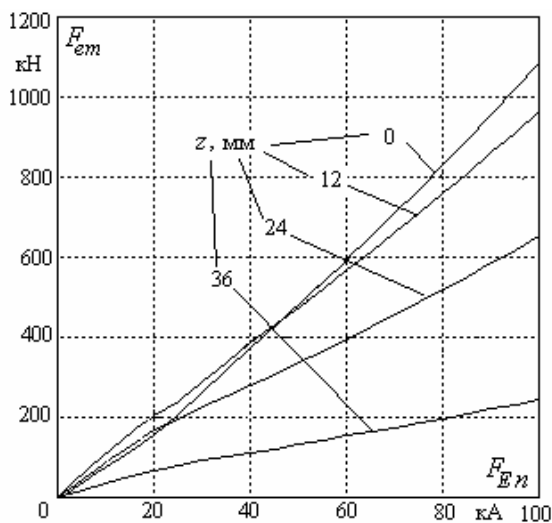


Рис. 5. Изменение результирующей силы  $F_{em}$  в зависимости от МДС  $F_{En}$  при различных положениях реактора

### ВЫВОДЫ

1. Основной особенностью рассмотренного ЛИЭД, предопределяющей распределение ролей сил разного происхождения и характер их зависимостей от взаимного расположения индуктора и реактора, а также от МДС обмоток, является очень сильное насыщение ферромагнитных сердечников.

2. При максимальном возбуждении и соответственно при сильном насыщении в итоговую тяговую силу ЛИЭД основной вклад дают электродинамиче-

ские силы, действующие непосредственно на обмотки, что является основанием для классификационного признака данного ЛИЭД - электродинамический.

3. Несмотря на преобладающий характер электродинамических сил, магнитная сила, действующая непосредственно на сердечники, также дает заметный вклад в тяговую силу, и пренебречь этим нельзя. Особенно это касается работы при меньших насыщениях магнитопровода, когда магнитная сила становится преобладающей.

4. Электродинамические силы, действующие непосредственно на проводники обмотки, по пазам вдоль длины ЛИЭД распределены неравномерно.

5. При сильном насыщении магнитопровода максимум силы развивается при сдвиге сердечников якоря и реактора на половину зубцового деления, а при меньших насыщениях этот максимум достигается после смещения реактора в сторону по ходу его движения из этой позиции.

6. Зависимости силового взаимодействия реактора и индуктора от МДС обмоток приближаются к линейным, в отличие от известного факта параболической зависимости в обычных электромагнитных системах с относительно слабым насыщением.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Невзрывные источники сейсмических колебаний. Справочник. М., "Недра", 1992.
- [2] Шнейерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная сейсморазведка с невзрывными источниками колебаний. М., "Недра", 1980.
- [3] Ямпольский Ю.Г. Анализ основных типов силовых линейных импульсных электрических двигателей // Электротехника.-1992.-№8-9.- С. 4-11.
- [4] Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко В.П., Ткаченко С.В., Фатенко А.Ю., Осташевский Н.А. Линейные импульсные электродинамические двигатели для невзрывных источников сейсмических колебаний // Вестник НТУ "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Электроэнергетика и преобразовательная техника.- Харьков: НТУ "ХПИ". - 2006. - №38.- С. 83-92.
- [5] Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко В.П., Ткаченко С.В., Фатенко А.Ю., Осташевский Н.А. "Машинная постоянная" линейного импульсного электродинамического двигателя для невзрывного источника сейсмических колебаний. // Вестник НТУ "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. - Харьков: НТУ "ХПИ".- 2007.- №24.- С. 5-10.
- [6] Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко С.В., Милых В.И. Выбор типа и основных параметров линейного импульсного электродвигателя для невзрывных сейсмоисточников. // Электротехніка і електромеханіка.-2008.-№3.- С. 41-44.
- [7] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.
- [8] Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехніка і електромеханіка.-2006.-№2.- С. 40-46.

Поступила 29.08.2008