

УДК 621.313.17

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОАКСИАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

Милых В.И., д.т.н., проф., Ткаченко С.В., асп.

Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков

61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21

E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

Розглядається коротко ходовий лінійний електродвигун електродинамічного типу з циліндричною електромагнітною системою, призначений для джерела сейсмічних коливань. Аналізується, як впливають розміри елементів сердечників якоря та реактора на ударну силу двигуна, яку він розвиває.

Ключові слова: лінійний електродвигун, сили, вплив, розміри елементів сердечників.

Linear electric motor with the short movement considers. It refers to the electrodynamic engine type and has cylindrical electromagnetic system. This engine is intended for a seismic vibrations source. Influence of armature and reactor elements dimensions on percussive force analysis is considered.

Key words: linear electric motor, force analysis, elements dimensions.

Введение. Рассматриваемый линейный электродвигатель (ЛЭД) предназначен для импульсного источника сейсмоколебаний [1-3], возбуждаемых при поиске полезных ископаемых. Собственно ЛЭД по сути является короткоходовым электромеханическим преобразователем и состоит из якоря и реактора. Их активными электромагнитными элементами являются цилиндрические ферромагнитные сердечники с «коллекторной» шихтовкой, в пазах которых расположены секционированные кольцевые обмотки (рис. 1) [4-6]. Силовое взаимодействие якоря и реактора при подаче импульса тока порождает рабочий импульс силы F_{em} .

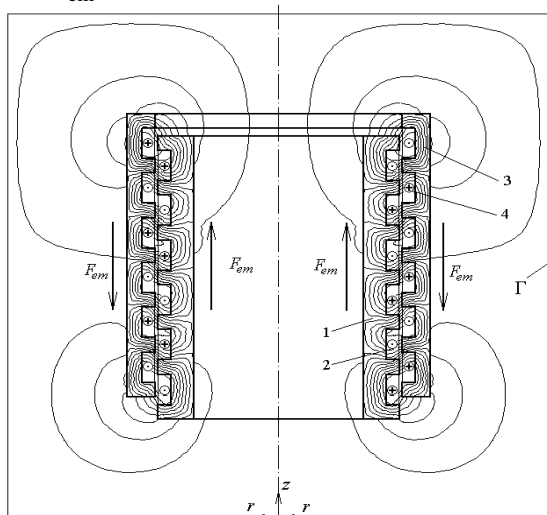


Рисунок 1 – Электромагнитная система ЛЭД:

1, 2 – сердечник и обмотка реактора;

3, 4 – сердечник и обмотка якоря

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.

Основы проектирования ЛЭД представлены в [4-6], а в [7, 8] проведен детальный численный анализ магнитных полей и силовых взаимодействий при различных значениях МДС обмоток и разных взаимных положениях реактора и якоря. Однако при этом использовались одни и те же размерные параметры якоря и реактора, которые выбраны в процессе проектирования на основе упрощенной модели магнитного поля.

Цель работы. Данная работа является продолжением представленных исследований ЛЭД [6-8]. Ее цель состоит в выявлении уровня влияния на развиваемую силу различных размерных параметров его магнитной системы. В дальнейшем это позволит осознанно поставить задачу оптимизации электромагнитной системы ЛЭД.

Материал и результаты исследования.

Методика расчета сил в ЛЭД.

Сложность расчета силовых взаимодействий вызвана очень сильным насыщением магнитопровода ЛЭД [7, 8], 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 численно-полевым расчетам.

Задача расчета силовых взаимодействий при численно-полевом подходе складывается из двух этапов: сначала рассчитывается магнитное поле с учетом реальной геометрии магнитной системы ЛЭД 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 ЛЭД, трехмерное магнитное поле можно рассчитывать в меридиональной плоскости, начинающейся от центральной оси симметрии (рис. 1).

Это поле описывается посредством тангенциальной составляющей векторного магнитного потенциала (ВМП) A_φ дифференциальным уравнением:

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

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

При численном 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 Γ 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 [9], 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).

Как известно [7, 10], полученное решение в виде распределения ВМП (пример картины магнитного поля дан на рис. 1) позволяет перейти к целому ряду электромагнитных параметров. В данном случае для анализа силовых взаимодействий в ЛЭД будем использовать следующие силы.

Через тензор напряжения Максвелла определяется результирующая электромагнитная сила взаимодействия реактора и якоря (рис. 1):

$$F_{em} = \frac{2\pi}{\mu_0} \int r B_r B_z dl, \quad (3)$$

где B_r и B_z – радиальная и аксиальная составляющие магнитной индукции, а интегрирование проводится по контуру l_δ в плоскости r, z , одна из сторон которого обязательно проходит в зазоре по координате z , а остальная часть охватывает полностью сердечник с обмоткой. Это может быть реактор или якорь – результат оказывается 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 системе имеет только аксиальную составляющую, и, естественно, силы F_{em} действуют на якорь и

реактор встречно, как показано на рис. 1.

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

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

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 ЛЭД.

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

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

Параметры исходной модели ЛЭД.

Как уже отмечено, исходный вариант ЛЭД сформирован на базе разработанной приближенной методики [4, 5], не сопряженной с численными расчетами магнитных полей. Приведем основные данные этого варианта, соответствующего рис. 1: внутренний диаметр сердечника реактора – 288 мм; наружный диаметр сердечника якоря – 512 мм; зазор – $\delta = 2$ мм; аксиальная длина сердечников – 533 мм; размеры пазов – 55×23 мм²; ширина зубцов – $b_z = 29$ мм; толщины спинок сердечников реактора $b_{sr} = 40$ мм и якоря – $b_{sa} = 27$ мм; число полюсов $p = 6$.

Данный ЛЭД рассчитан на импульс силы, достигающей порядка 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.

Максимум силы, как показано в [7], развивается при взаимном положении реактора и якоря, когда оси зубцов одного совпадают с осями пазов другого, как на рис. 1. Смещение в рабочем цикле из этого положения обозначим через ζ , тогда в обозначенном исходном положении $\zeta = 0$.

Анализ силовых взаимодействий.

Приведенные теоретические основы расчета сил, а также представленные данные исходного варианта ЛЭД позволяют перейти к реализации цели данной работы. А именно, индивидуальным и параллельным варьированием параметров магнитной системы определить их роль в формировании сил, а также возможности эффективного влияния на силы изменением тех или иных параметров.

Первым варьировемым параметром ЛЭД избрано число полюсов p . Естественно, пропорционально этому увеличивалась длина ЛЭД. Результаты расчетов представлены в табл. 1, где электромагнитная сила F_{em} (3) дана как в абсолютных, так и в относительных единицах (о.е.) – F_{em}^* , причем за базу принято значение при $p = 6$, соответствующем основному варианту. Очевидно, что на

ращивание силы F_{em} носит практически линейный характер, исключая первое значение $p = 2$, где роль рассеяния магнитного поля еще существенна. В итоге, при большей полюсности идет блочное наращивание параметров ЛЭД, т.е. фактически очередная пара полюсов не влияет на действие предыдущей.

Таблица 1 – Зависимость сил от числа полюсов

p	2	4	6	8
F_{em} , кН	331	708	1085	1466
F_{em}^* , о.е.	0,305	0,653	1	1,351
F_{edr} , кН	207	468	728	990
F_{eda} , кН	206	461	719	972

В табл. 1 даны также электродинамические силы (4), приходящиеся на обмотки реактора F_{edr} и якоря F_{eda} . Они близки друг к другу по величине, и, что примечательно, дают основной вклад в силу F_{em} .

Как и предполагалось, магнитопровод ЛЭД сильно насыщен. Так магнитная индукция в рассмотренных расчетах достигает, Тл: в зубцах 2,85..2,97, в спинках сердечников – 1,9..2,7, в зазоре – 3,5. Поэтому следующая серия расчетов должна была показать, насколько существенно состояние магнитопровода для формируемых сил.

Роль магнитопровода в целом проявилась после расчетов для исходного варианта ЛЭД, но с неферромагнитными сердечниками. Получились следующие значения: $F_{em} = F_{edr} = F_{eda} = 290$ кН. Равенство всех сил естественно, так как отсутствует сила F_m (5). Но в целом роль даже насыщенных сердечников оказалась велика: их присутствие довело силу F_{em} с 290 до 1085 кН (табл. 1).

Следующая серия расчетов являлась пробной для оценки влияния изменений размеров элементов магнитопровода на создаваемую силу. Конкретно проведены расчеты следующих вариантов, где изменение того или иного размера приводит к существенному уменьшению насыщения данного элемента магнитопровода, причем толщины спинок сердечников по сравнению с исходным вариантом удваивались, размер зубцов – в меньшей степени:

М0 – исходный вариант при $b_{sr} = 40$ мм; $b_{sa} = 27$ мм; $b_z = 29$ мм; М1 – отличие от исходного варианта размером $b_{sr} = 80$ мм; М2 – отличие от исходного варианта размером $b_{sa} = 54$ мм; М3 – отличие от исходного варианта размерами $b_{sr} = 80$ мм и $b_{sa} = 54$ мм; М4 – отличие от исходного варианта размером $b_z = 39$ мм.

Результаты расчетов силы F_{em} даны в табл. 2 с соответствующими обозначениями представленных вариантов. Очевидна роль ослабления насы-

щения спинок сердечников реактора и якоря: силы возрастают, хотя и не радикально, причем в первом случае в меньшей степени. Влияние насыщения зубца с его расширением на силу оказалось более значительным. Поэтому варьирование ширины зубцов проведено в более широких пределах (при этом, естественно, длина ЛЭД возросла, так как размеры пазов не изменяли). Результаты расчетов силы ЛЭД представлены в табл. 3.

Таблица 2 – Зависимость сил от изменений размеров сердечников при $p=6$

Вариант	М0	М1	М2	М3	М4
F_{em} , кН	1085	1109	1118	1153	1257

Таблица 3 – Зависимость сил от ширины зубцов сердечников при $p=6$

b_z , мм	29	34	39	44
F_{em} , кН	1085	1181	1257	1319

Для одного из предпочтительных вариантов зубца, когда сила уже достаточно велика, но длина ЛЭД остается еще в приемлемых пределах, проведено поэтапное одновременное изменение толщин спинок сердечников реактора и якоря. Результаты расчета сил представлены в табл. 4. Здесь может быть предпочтительным вариант между исходным (1-ая колонка) и следующим (2-ая колонка), так как дальше будет происходить заметное увеличение массы сердечников при незначительном росте сил.

Таблица 4 – Зависимость сил от толщин спинок сердечников при $p=6$ и $b_z=39$ мм

b_{sr} , мм	40	50	60	80
b_{sa} , мм	27	33,75	40,5	54
F_{em} , кН	1257	1324	1358	1383

После того, как выяснены основные аспекты влияния на силу ЛЭД в начальном положении (рис. 1, $\zeta = 0$), провели оценочные расчеты изменения силы при перемещении реактора относительно якоря. Это проделано для исходного варианта сердечников М0 ($p = 6$ и $b_z = 29$ мм $b_{sr} = 40$ мм; $b_{sa} = 27$ мм) и одного из модифицированных вариантов М5 ($p = 6$ и $b_z = 39$ мм $b_{sr} = 50$ мм; $b_{sa} = 33,75$ мм) при неизменном значении МДС $F_{En} = 100$ кА. Результаты расчетов при пошаговом изменении ζ в пределах смещения реактора на ползубцовое деление в своем варианте представлены в табл. 5 и на рис. 2. Очевидно, что различие в силах на всем протяжении рабочего хода ЛЭД примерно сохраняется в той же пропорции, что и в начальном положении. Поэтому проведенный сравнительный анализ сил для различных параметров сердечников в их начальном положении можно считать достаточным, для сравнения эффективности работы ЛЭД во всем диапазоне рабочего хода.

Было выявлено также, что роль электродинамической силы F_{ed} во всех рассчитанных вариантах остается примерно такой же, как это было показано в табл. 1, но с ее некоторым снижением при уменьшении насыщения сердечников. Что касается силы, приложенной непосредственно к сердечникам, то она легко определяется на основе формулы (5).

Таблица 5 – Зависимость силы F_{em} (кН) от взаимного смещения сердечников для двух их вариантов

ζ , мм	0	6	12	18	24
М0	1085	1042	965	827	654
М5	1324	1281	1181	1023	842
ζ , мм	30	36	42	47	
М0	459	245	0	–	
М5	644	439	213	0	

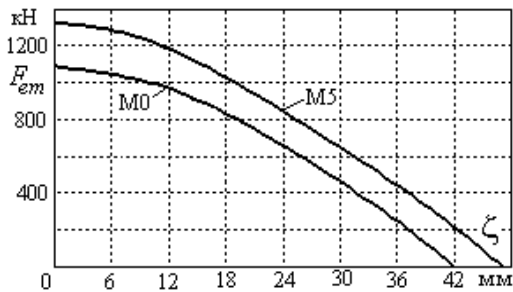


Рисунок 2 – Зависимость развиваемой силы ЛЭД от взаимного положения его реактора и якоря

В завершение было проведено варьирование зазора ЛЭД. Расчетные данные для двух моделей М0 и М4, которые уже представлялись и отличаются шириной зубцов, даны в табл. 6. Значимость величины зазора для развиваемой силы ЛЭД очевидна.

Таблица 6 – Зависимость силы F_{em} (кН) от зазора

δ , мм	1	2	3	4
$b_z = 29$ мм	1130	1090	1060	1020
$b_z = 39$ мм	1280	1250	1200	1180

Выводы. 1. Расчетный анализ показал, что изменение размерных параметров магнитной системы ЛЭД позволяет эффективно влиять на его силовую эффективность. Само наличие ферромагнитных сердечников, несмотря на их сильное насыщение, дает увеличение силы примерно в 3,7 раза. Но в рамках варианта с сердечниками преобладающую роль все-таки имеет электродинамическая сила, приложенная непосредственно к обмоткам.

2. Нарастивание числа полюсов при сохранении размеров всех элементов магнитной системы ЛЭД приводит к практически пропорциональному росту силы и сечения его активной части. Увеличение же только толщины спинок сердечников приводит

к опережающему росту этого сечения по сравнению с ростом тяговой силы.

3. Наиболее эффективным средством влияния на силы является изменение ширины зубцов сердечников: темп роста сил по сравнению с темпом роста площади сечения активной части может быть на 20-30 % выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Невзрывные источники сейсмических колебаний. Справочник. – М.: Недра, 1992.
2. Шнеерсон 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». Сб. науч. тр. 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». Сб. науч. тр. 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 // Электротехника і електромеханіка. 2008. - №3. – С. 41-44.
7. Милых В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // Электротехніка і електромеханіка. – 2008. – №6. – С. 36-39.
8. Милых В.И., Ткаченко С.В. Анализ магнитного поля в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // Электротехніка і електромеханіка. – 2009. – №2.
9. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.
10. 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.

Стаття надійшла 15.03.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Чорним О.П.