

## АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ 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](mailto: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](mailto:potencial@potencial.kharkov.com)

*Розглянуті структура і параметри магнітного поля в лінійному імпульсному електродинамічному двигуні для джерел сейсмоколиваний, що відрізняється циліндровою електромагнітною системою і сильним насиченням магнітопроводу. Показані зміни магнітного поля, що відбуваються при зміні МРС обмоток якоря і реактора, зміні їх взаємного розташування, а також ефективність ферромагнітних сердечників порівнянням з варіантом, коли вони відсутні.*

*Рассмотрены структура и параметры магнитного поля в линейном импульсном электродинамическом двигателе для источников сейсмоколебаний, отличающемся цилиндрической электромагнитной системой и сильным насыщением магнітопровода. Показаны изменения магнитного поля, происходящие при изменении МДС обмоток якоря и реактора, изменении их взаимного положения, а также эффективность ферромагнитных сердечников сравнением с вариантом, когда они отсутствуют.*

### ВВЕДЕНИЕ

Линейный импульсный электродвигатель (ЛИЭД), являющийся рабочим органом импульсного электромеханического сейсмоисточника [1-3], предназначенного для возбуждения в земной коре сейсмических колебаний при поиске полезных ископаемых, был представлен в [4-6]. Этот ЛИЭД является короткоходовым и имеет цилиндрическую конструкцию, которая показана на рис.1.

Основными элементами двигателя являются порождающие силовое взаимодействие якорь и реактор. Преобладающее движение вверх под действием развиваемого импульса силы осуществляет реактор. Его отскок ограничивает и демпфирует амортизатор, а рабочее воздействие на грунт, вызывающее сейсмоколебания, оказывает силовая «отдача» 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.

Естественно, что принцип действия ЛИЭД основан на существовании и взаимодействии магнитных полей, которые являются основой расчета основных электромагнитных и силовых параметров. Однако принципы расчета, которые представлялись в [4], построены на весьма упрощенных моделях магнитного поля, что целесообразно только на начальных этапах проектирования как первое приближение.

Сложность решения задачи расчета магнитного поля вызвана, прежде всего, очень сильным насыщением магнітопровода ЛИЭД, а также плохо прогнозируемой организацией магнитного поля при различных взаимных положениях якоря и реактора в процессе работы двигателя.

Поэтому, ставя целью данной работы анализ магнитного поля в ЛИЭД представленной конструк-

ции, ее достижение обеспечиваем на основе современных подходов, а именно применением численно-полевого анализа, для которого упомянутые сложности не являются проблематичными, в отличие от аналитических подходов.

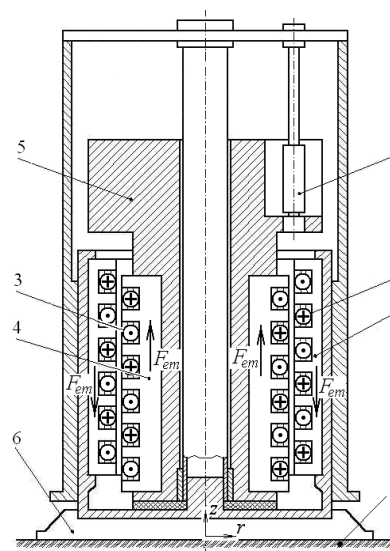


Рис.1. Устройство линейного электродвигателя:  
1 – кольцевая обмотка якоря; 2 – магнітопровод якоря;  
3 – кольцевая обмотка реактора; 4 – магнітопровод реактора; 5 – инертная масса; 6 – опорная плита-конус; 7 – амортизатор; 8 – грунт

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ПРИНЦИП РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Учитывая осевую симметрию магнитной системы ЛИЭД, к которой относим ферромагнитные сердечники и обмотки, трехмерное магнитное поле можно рассчитывать в любой меридиональной плоскости, проходящей через центральную ось симметрии. Соот-

ветствующая расчетная модель электромагнитной системы генератора ЛИЭД представлена на рис.2 меридианным сечением, что соответствует симметричной половине конструкции, изображенной на рис.1.

В обусловленной модели магнитное поле описывается посредством тангенциальной составляющей векторного магнитного потенциала (ВМП)  $A_\varphi$  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 (аксиальная) координаты цилиндрической системы;  $J_\varphi$  – угловая составляющая плотности тока в обмотках (в данной постановке вихревыми токами в шихтованном сердечнике и других элементах конструкции 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 для ВМП граничное условие Дирихле:  $A_{\varphi\Gamma} = 0$ .

В условиях конструкции ЛИЭД достаточно достоверный расчет магнитного поля может быть сделан только численными методами [7,8]. Из них был избран метод конечных элементов, который позволяет весьма точно отобразить геометрическую структуру ЛИЭД и учитывать насыщение ферромагнитных материалов. Для этого метода имеется программное обеспечение, например, программа FEMM [9].

В условиях рабочего режима реактор перемещается относительно якоря, поэтому интерес представляют распределения магнитных полей в различных взаимных положениях, которые будем характеризовать относительным смещением реактора и обозначим через  $\zeta$ , измеряя в мм. В исходном положении реактора, как на рис.1,  $\zeta = 0$ , в конечном положении, когда зубцы реактора и индуктора совместятся, т.е. после хода реактора на половину полюсного деления  $\tau_p$ , что соответствует  $\zeta = 42$  мм.

Расчетам подверглась конструкция с уже представившимися в [6] параметрами: диаметры сердечников внутреннего реактора – 288 мм и; наружный якоря – 512 мм; зазор – 2 мм; аксиальная длина сердечников – 533 мм; размеры пазов –  $55 \times 23$  мм<sup>2</sup>; ширина зубцов – 29 мм. Данный ЛИЭД рассчитан на импульс силы с максимумом в 1000 кН. Соответственно было выявлено, что для этого необходим ток в обмотках, при котором МДС  $F_{En}$ , приходящаяся на паз, должна достигать порядка 100 кА.

Рассчитываемые по программе FEMM магнитные поля при указанной МДС  $F_{En}$  частично представлены на рис.2 их картиной на симметричной половине сечения магнитной системы ЛИЭД, а для основного

варианта при  $\zeta = 0$  на рис.3 дан фрагмент расчетной модели. По сути это линии равного магнитного потока  $2\pi r A_\varphi = \text{const}$ , причем крайние значения в области расчета рис.2 при указанной МДС  $F_{En}$  составляют (-0,1624 и +0,1634) Вб. В основном варианте при  $\zeta = 0$  магнитная индукция достигает в зубцах 2,85..2,97 Тл, в спинках сердечников – 1,9..2,7 Тл, в зазоре – 3,5 Тл.

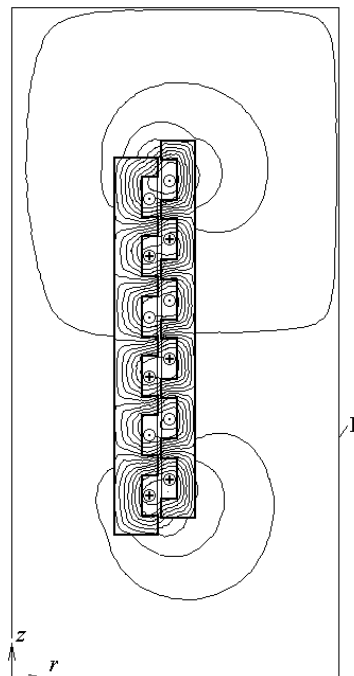


Рис.2. Расчетная модель и магнитное поле при  $\zeta = 18$  мм

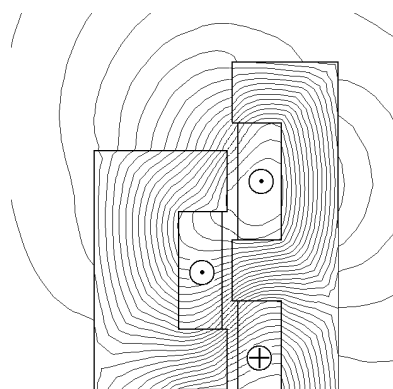


Рис.3. Фрагмент области расчета с картиной магнитного поля при  $\zeta = 0$

#### АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРА ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Численные расчеты магнитных полей ЛИЭД открывают возможности определения целого комплекса его электромагнитных параметров [10].

Через ВМП определяются координатные составляющие и модуль магнитной индукции:

$$B_r = \frac{\partial A_\varphi}{\partial z}; \quad B_z = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (r A_\varphi)}{\partial r}; \quad B = \sqrt{B_r^2 + B_z^2}. \quad (2)$$

Уровень магнитного поля в объеме ЛИЭД представим распределением магнитной индукции вдоль определенных линий при максимальном значении

МДС  $F_{En} = 100$  кА и при разных значениях  $\zeta$  – при разном положении реактора относительно якоря. Серия этих распределений показана на рис.4-7.

Так на рис.4 представлено распределение радиальной составляющей магнитной индукции в зазоре вдоль аксиальной линии по всей длине ЛИЭД. Очевидно, что максимумы магнитной индукции растут по мере смещения реактора и достигают весьма больших величин примерно от 3 до 4 Тл. Форма кривых  $B_r(z)$  достаточно сложна и также претерпевает изменения. Заметим, что эта форма заметно отличается от упрощенной модели магнитного поля, принятой при аналитических расчетах в [4].

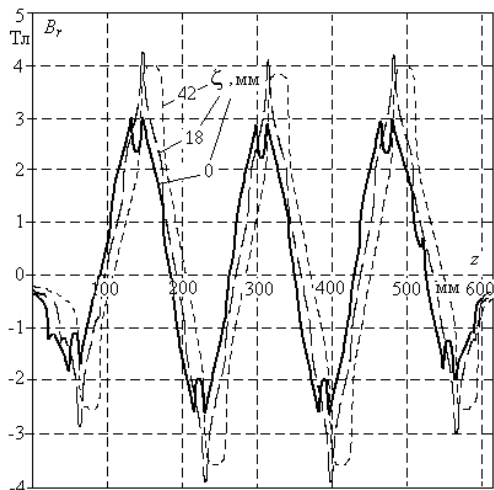


Рис.4. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции на средней линии зазора при разных значениях  $\zeta$

На рис.5 даны распределения модуля магнитной индукции вдоль аксиальных линий, которые проведены на среднем радиальном уровне зубцов реактора и якоря, соответственно. Ситуация с уровнями насыщения зубцов здесь очевидна и пики индукции достигают 3,3..3,8 Тл. Достаточно велика магнитная индукция в пазах – до 2,0..2,4 Тл, что соизмеримо, хотя и меньше по сравнению со значениями в зубцах.

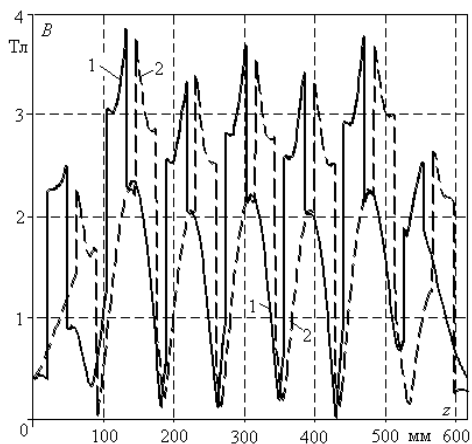


Рис.5. Распределение модуля магнитной индукции по аксиальным линиям на середине высоты зубцов реактора – 1 и якоря – 2 при  $\zeta = 0$

Дополнительно рис.6 показывает, как изменились значения и характер модуля магнитной индукции вдоль аксиальной линии на среднем радиальном уровне зубцов реактора в его крайних положениях относительно якоря. В конечном положении индукция в зубцах превышает 4 Тл.

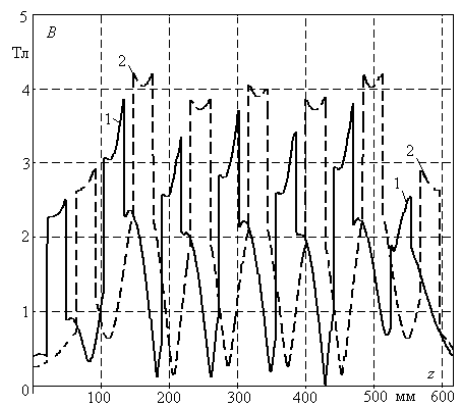


Рис.6. Распределение модуля магнитной индукции на средней линии по высоте зубцов реактора при: 1 -  $\zeta = 0$  и 2 -  $\zeta = 42$  мм

Более детально рассмотреть некоторые из представленных распределений можно на рис.7, где протяженность аксиальной линии ограничена двумя полюсными делениями  $\tau_p$  в средней части ЛИЭД.

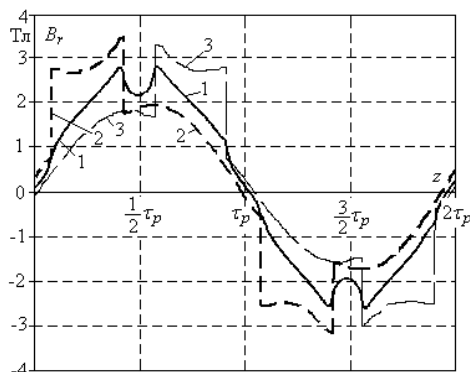


Рис.7. Распределение магнитной индукции на средней линии по высоте: 1 – зазора, 2 - зубцов реактора и 3 – зубцов якоря в пределах двух полюсных делений при  $\zeta = 0$

На рис.8 даны распределения модуля магнитной индукции вдоль аксиальных линий, которые проведены на среднем радиальном уровне спинок реактора и якоря, соответственно. Уровни насыщения здесь очевидны и пики индукции достигают 2,0..2,7 Тл.

При достаточно больших значениях магнитной индукции в сердечниках ЛИЭД и ввиду открытой из структуры происходит заметное вытеснение магнитного поля за их пределы. Это иллюстрирует рис.9, где дано распределение нормальной составляющей магнитной индукции на линиях по периметру  $abcd$  поверхности сердечников ЛИЭД при  $\zeta = 0$ . Если не считаться с локальными всплесками индукции в угловых точках торцов сердечников, то можно констати-

ровать, что на рассматриваемой поверхности магнитная индукция достигает примерно 0,5 Тл.

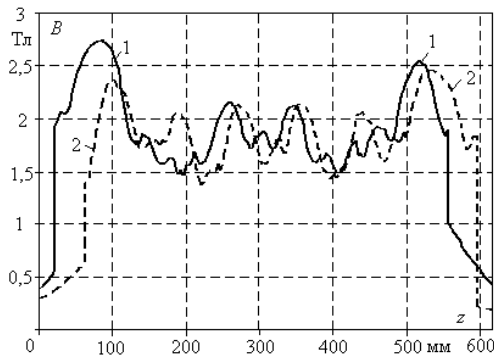


Рис.8. Распределение модуля магнитной индукции на средних линиях в спинках сердечников реактора – 1 и якоря – 2 при  $\zeta = 0$

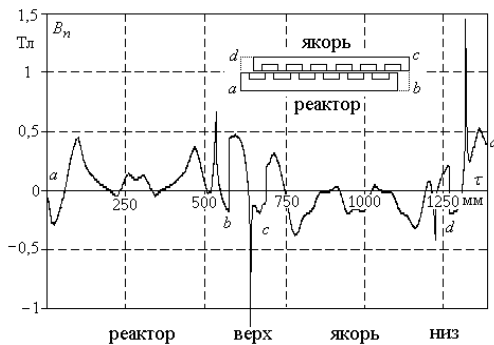


Рис.9. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции на линиях по периметру поверхности сердечников ЛИЭД при  $\zeta = 0$

В серии рисунков на рис.11 и рис.12 приведены графики зависимости интегральных величин магнитного поля, а именно следующие магнитные параметры ЛИЭД.

Магнитный поток в зазоре на полюсном делении

$$\Phi_{\tau} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\delta} (A_{\varphi, z+\tau_p} - A_{\varphi, z}), \quad (3)$$

где  $A_{\varphi, z+\tau_p}, A_{\varphi, z}$  – значения ВМП в зазоре в точках, отстоящих друг от друга на полюсное деление.

Результаты расчета магнитного поля позволяют через распределение ВМП определить магнитное потокоосцепление обмотки на основе выражения:

$$\Psi_e = 2\pi w_e \left( \frac{1}{S_{e+}} \int_{S_{e+}} (r A_{\varphi}) dz dr - \frac{1}{S_{e-}} \int_{S_{e-}} (r A_{\varphi}) dz dr \right), \quad (4)$$

где  $S_{e+}, S_{e-}$  – площади поперечного сечения катушек обмотки с разным направлением тока по всем пазам;  $w_e$  – число витков на один паз.

Если интегрирование в (4) проводится по всем пазам реактора и якоря, то получается суммарное магнитное потокоосцепление последовательно соединенных обмоток. Для обобщающей иллюстрации на рис.11,б и рис.12,б приводятся значения единичных магнитных потокоосцеплений из расчета на некоторый один усредненный виток, то есть в (4) принято  $w_e = 1$ .

Анализ кривых на рис.11,а показывает, что насыщение магнитопровода ЛИЭД в исходном поло-

жении при  $\zeta = 0$  происходит примерно при МДС  $F_{En}$ , равной 20 кА, в конечном положении магнитопровод насыщается при значительно меньшей МДС. Зависимости  $\Psi_w$  близки к предыдущим, хотя полного подобия нет, так как берется по местам расположения непосредственно обмоток и в пределах всего ЛИЭД. В зоне перенасыщения магнитопровода все зависимости приближаются к прямолинейным.

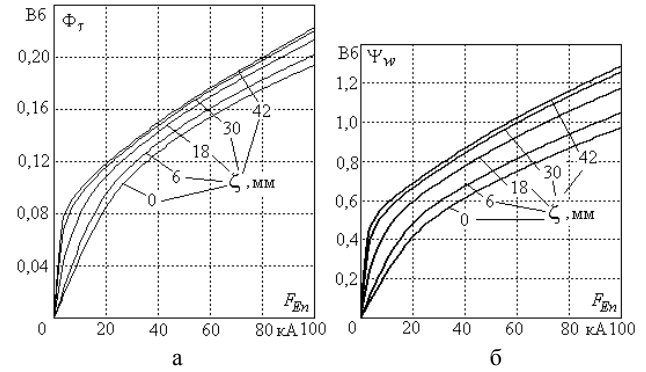


Рис.11 – Зависимости а) магнитного потока  $\Phi_{\tau}$  в зазоре на полюсном делении и б) магнитного потокоосцепления обмоток  $\Psi_w$  от МДС  $F_{En}$  при разных положениях реактора  $\zeta$

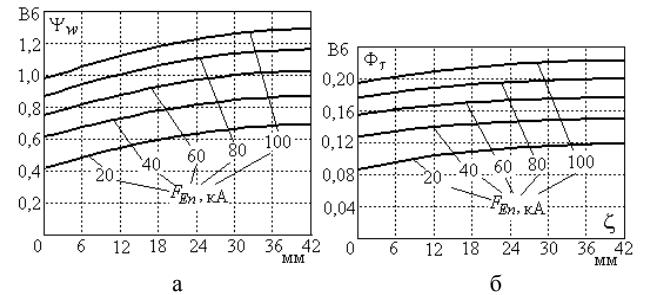


Рис.12. Зависимости а) магнитного потока  $\Phi_{\tau}$  в зазоре на полюсном делении и б) магнитного потокоосцепления обмоток  $\Psi_w$  от положений реактора  $\zeta$  при разных МДС  $F_{En}$

Зависимости на рис.12 основаны, в принципе, на той же информации, что и на рис.11, но со сменой ролей  $F_{En}$  и  $\zeta$ . Теперь это набор функций с аргументом  $\zeta$  при  $F_{En} = \text{const}$ . Очевидно, что магнитные параметры ЛИЭД заметно зависят от  $\zeta$ , хотя и не в той мере, как от  $F_{En}$ .

Зависимости  $\Phi_{\tau}(F_{En})$  с рис.11,а повторены на рис.13 для двух крайних значений  $\zeta$  и снабжены дополнительными построениями для определения коэффициента магнитного насыщения магнитопровода. Этот коэффициент в соответствии со стандартным подходом [11] определяется как отношение соответствующих МДС (рис.13):

$$k_{\mu} = \frac{F_{\mu}}{F_{\delta}}. \quad (5)$$

Очевидно, что при движении реактора этот коэффициент меняется весьма значительно и его край-

ние значения составили:  $k_{\mu} = 3,1$  при  $\zeta = 0$  и  $k_{\mu} = 11,8$  при  $\zeta = 42$  мм.

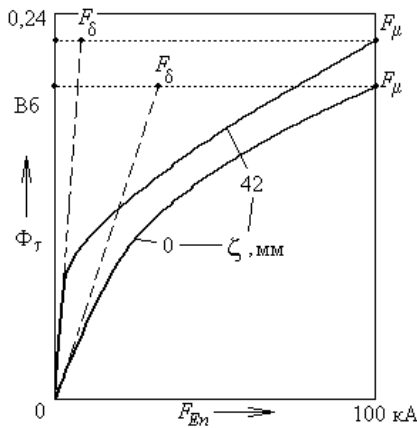


Рис.13. К определению коэффициента насыщения магнитопровода

Для того, чтобы выявить интегральное распределение магнитного поля по длине магнитной системы ЛИЭД, рассмотрим магнитные потоки на последовательности полюсных делений, ориентируясь на точки, выделенные на рис.14. Фактически берутся потоки, пронизывающие цилиндрические поверхности, проходящие по среднему радиусу зазора и имеющие высоты от точки до точки из набора  $z_0, z_1, z_2, \dots, z_7$ . Конкретно, если взять точки с номерами  $k$  и  $k+1$ , то магнитный поток через цилиндр с образующей  $z_{k+1} - z_k$  по формуле, аналогичной (3), составляет:

$$\Phi_{k,k+1} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\delta} (A_{\varphi,z_{k+1}} - A_{\varphi,z_k}), \quad (6)$$

где  $A_{\varphi,z_{k+1}}, A_{\varphi,z_k}$  – значения ВМП в зазоре в определенных точках в области расчета на рис. 14.



Рис.14. Расположение точек, разделяющих полюсные деления на аксиальной линии в зазоре ЛИЭД

Результаты расчетов магнитных потоков для модели с рис.14 при МДС  $F_{EH} = 100$  кА представлены в табл.1. Из неё очевидна неравномерность распределение магнитных потоков по длине ЛИЭД, даже если не учитывать индивидуальные особенности участков  $z_1 - z_0$  и  $z_7 - z_6$ , находящихся на краях магнитной системы и простирающихся за ее пределы.

Табл.1. Магнитные потоки по длине ЛИЭД, Вб

$\Phi_{z_0,z_1}$	$\Phi_{z_1,z_2}$	$\Phi_{z_2,z_3}$	$\Phi_{z_3,z_4}$	$\Phi_{z_4,z_5}$	$\Phi_{z_5,z_6}$	$\Phi_{z_6,z_7}$
0,147	0,214	0,165	0,195	0,166	0,214	0,145

Известно, что в электрических машинах степень полезного использования магнитного потока оценивается коэффициентом рассеяния. Однако в случае ЛИЭД представляется целесообразным для этой же цели ввести коэффициент эффективности использо-

вания магнитного потока. Его суть поясним с помощью рис.16, где изображен фрагмент магнитной системы с при  $\zeta = 0$  в зоне третьих пазов якоря и реактора снизу. Здесь показана структура силовых линий магнитного поля, замыкающихся в пределах одного полюсного деления, здесь определяется магнитный поток  $\Phi_{\tau} = 0,0976$  Вб. Этот магнитный поток замыкается вокруг катушек ректора и якоря этого же полюсного деления. Их среднее магнитное потокосцепление из расчета на один виток по формуле на основе (4) составляет  $\Psi_{av,1} = 0,0746$  Вб. В энергетическом, а значит и в силовом отношении полезную нагрузку несет именно магнитное потокосцепление. Поэтому коэффициент эффективности использования магнитного потока:

$$k_{ef\Phi} = \frac{\Psi_{av,1}}{\Phi_{\tau}} = 0,765, \quad (7)$$

что может использоваться для оценки магнитной системы ЛИЭД с точки зрения использования магнитного поля.

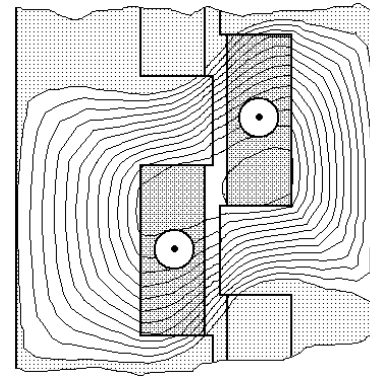


Рис.15. К определению коэффициента использования магнитного потока

В ЛИЭД с сильно насыщенным магнитопроводом, когда магнитная индукция достигает в зубцах  $2,8..3,0$  Тл, в спинках сердечников –  $1,9..2,7$  Тл, в зазоре –  $3,5$  Тл может возникнуть вопрос, а насколько эффективными оказываются ферромагнитные сердечники. Наиболее естественным путем их оценки с точки зрения магнитного поля является сравнение расчетных данных для моделей ЛИЭД с ферромагнитными сердечниками, что уже представлено, и без них.

Картина магнитного поля для ЛИЭД при неферромагнитных сердечниках представлена на рис.16, распределение магнитной индукции в зазоре – на рис.17. Крайние значения магнитного потока  $2\pi r A_{\varphi} = \text{const}$  в области расчета рис.16 при указанной МДС  $F_{EH}$  составляют  $(-0,07594$  и  $+0,08193)$  Вб.

Сравнение рис.16 с рис.2 и рис.17 с рис.4 позволяет увидеть ощутимые изменения, которые вносят ферромагнитные сердечники. Кроме того, отметим, что при отсутствии ферромагнитных сердечников среднее значение магнитной индукции в зазоре на полюсном делении составляет  $0,747$  Тл, магнитного потока –  $0,08203$  Вб, магнитное потокосцепление об-

моток – 0,4398 Вб. В целом это показывает, что удаление ферромагнитного сердечника, даже сильно насыщенного, привело бы к уменьшению основных магнитных параметров ЛИЭД в 2,2...2,4 раза.

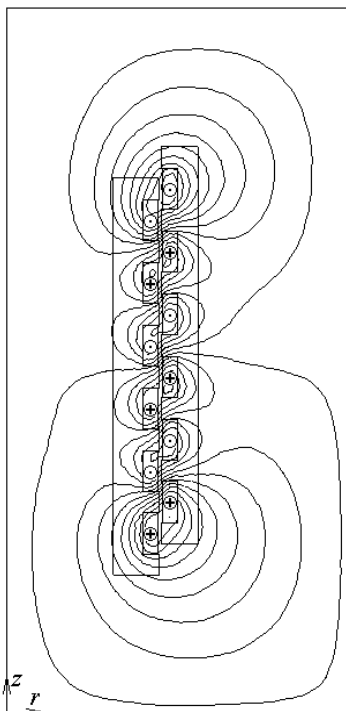


Рис.16. Картина магнитного поля ЛИЭД при неферромагнитных сердечниках ( $F_{En} = 100$  кА,  $\zeta = 0$ )

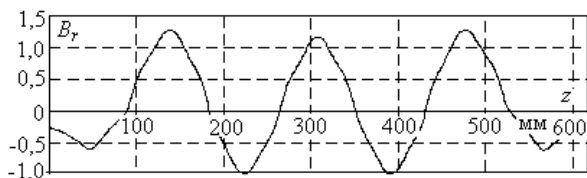


Рис.17. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции на средней линии зазора при МДС  $F_{En} = 100$  кА и при  $\zeta = 0$  для модели ЛИЭД без ферромагнитных сердечников

## ВЫВОДЫ

1. Основной особенностью рассмотренного ЛИЭД, предопределяющей характер и величину магнитного поля, его зависимости от взаимного расположения индуктора и реактора, а также от МДС обмоток, является очень сильное насыщение ферромагнитных сердечников. Значения магнитной индукции на отдельных участках магнитопровода при номинальной МДС достигают 2,8-3,0 Тл, в спинках сердечников 1,9-2,7 Тл, в зазоре – 3,5 Тл.

2. В широких и неглубоких пазах сердечников реактора и якоря магнитная индукция соизмерима с аналогичной величиной в зубцах, хотя и оказывается несколько меньшей.

3. Распределение магнитных потоков полюсных делений по длине ЛИЭД оказывается заметно неравномерным.

4. За пределами сердечников магнитопровода ЛИЭД магнитное поле имеет достаточно большую величину – до 0,5 Тл в отдельных местах на их поверхности.

5. Характер распределения и величина магнитной индукции в зазоре ЛИЭД существенно зависят от взаимного расположения реактора и якоря.

6. Коэффициент насыщения магнитной системы ЛИЭД меняется в пределах примерно от 3 до 12 в зависимости от положения реактора.

7. Несмотря на сильное насыщение магнитопровода ЛИЭД его эффективность можно оценить увеличением магнитных параметров в 2,2-2,4 раза.

## 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». 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 С.В., Милых В.И. Выбор типа и основных параметров линейного импульсного электродвигателя для невзрывных сейсмоисточников. // Электротехника і електромеханіка.-2008.-№3.-С.41-44.
- [6] Милых В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний. // Электротехніка і електромеханіка.-2008.-№6.-С.20-23.
- [7] Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков. Пер. с англ.-М.: Мир, 1986.-318 с.
- [8] Chari M.V.K., Silvester P. Element analysis of magnetically Saturated DC machines // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1971. PAS-90, N2, p.2362-2372.
- [9] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 22, 2006 // <http://femm.berlios.de>, 2005.
- [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.
- [11] Вольдек А.И. Электрические машины. -Л.: Энергия,-1978.-832 с.

Поступила 3.11.2008

## АННОТАЦИЯ СТАТЬИ

*Milykh V.I., Tkachenko S.V.*

### **Analysis of the magnetic field in linear electric motor for seismic vibrations sources**

A structure and parameters of the magnetic field is considered in a linear impulsive electrodynamic motor for the sources of seismic vibrations. An motor differs the cylindrical electromagnetic system and its strong magnetic saturation. The changes of the magnetic field, what is going on at the change of MMF of windings of anchor and reactor, are shown, at the change of their mutual position. Efficiency of ferromagnetic mandrels is exposed comparing to the variant, when they absent.

*Key words* – impulse electrodynamic electric motor for seismic vibrations, magnetic field

### СПИСОК АВТОРОВ

*Мильх Владимир Иванович*

*Ткаченко Сергей Валериевич*

Рассмотрены структура и параметры магнитного поля в линейном импульсном электродинамическом двигателе для источников сейсмоколебаний. Двигатель отличается цилиндрической электромагнитной системой и сильным насыщением магнитопровода. Показаны изменения магнитного поля, происходящие при изменении МДС обмоток якоря и реактора, при изменении их взаимного положения. Выявлена эффективность ферромагнитных сердечников сравнением с вариантом, когда они отсутствуют.