

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЛИНЕЙНОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Розглянуті структура і параметри магнітного поля в лінійному імпульсному електродинамічному двигуні для джерел сейсмоколябаній, що відрізняється циліндровою електромагнітною системою і сильним насиченням магнітопроводу. Показані зміни магнітного поля, що відбуваються при зміні МДС 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 магнітопроводу. 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.

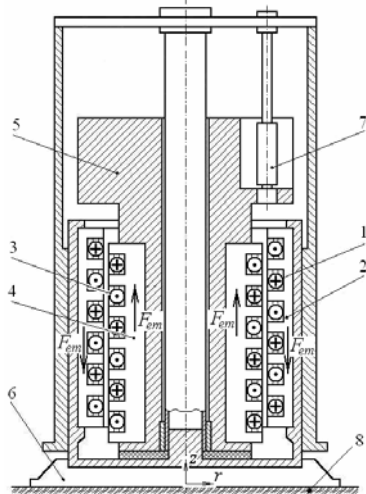


Рис. 1. Устройство линейного электродвигателя:

- 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

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 магнітопроводу 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 конструкции, 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.

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

В обусловленной модели магнитное 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 (аксиальная) координаты цилиндрической системы; J_φ – угловая составляющая плотности тока в обмотках (в данной постановке вихревыми токами в шихтованном сердечнике и других элементах конструкции пренебрегаем); μ – магнитная проницаемость.

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.

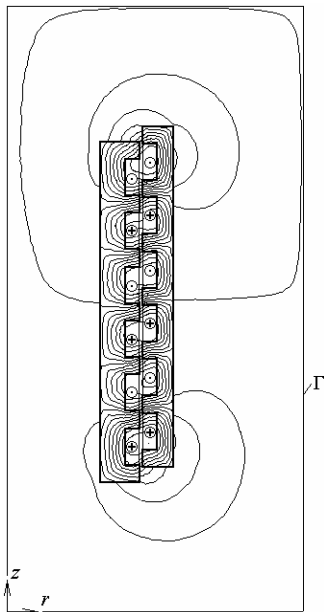


Рис. 2. Расчетная модель и магнитное поле при $\zeta = 18$ мм

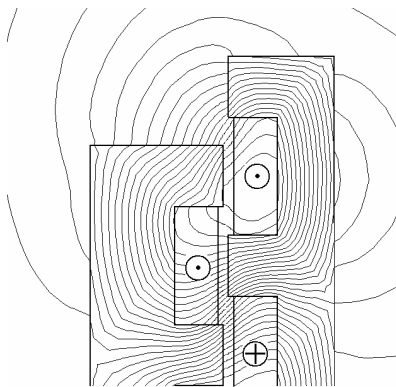


Рис. 3. Фрагмент области расчета с картиной магнитного поля при $\zeta = 0$

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 Γ прямоугольной области можно было принять для ВМП граничное условие Дирихле: $A_{\phi\Gamma} = 0$.

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 ζ , измеряя в мм. В исходном положении реактора, как на рис. 1, $\zeta = 0$, в конечном положении, когда зубцы реактора и индуктора совмещаются, т.е. после хода реактора на половину полюсного деления τ_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 – 55×23 мм²; 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.

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:

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

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 ζ – 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].

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.

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.

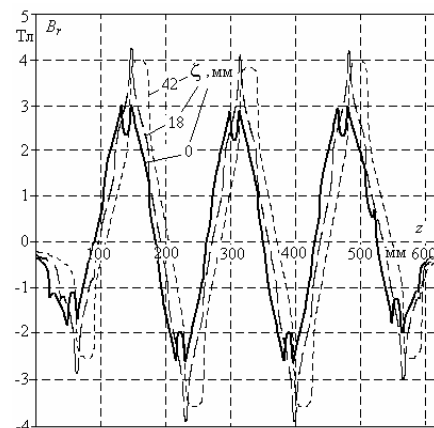


Рис. 4. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции на средней линии зазора при разных значениях ζ

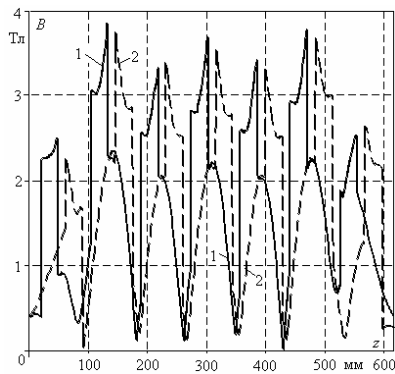


Рис. 5. Распределение модуля магнитной индукции по аксиальным линиям на середине высоты зубцов реактора – 1 и якоря – 2 при $\zeta = 0$

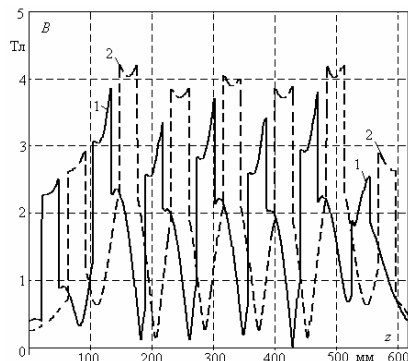


Рис. 6. Распределение модуля магнитной индукции на средней линии по высоте зубцов реактора при: 1 – $\zeta = 0$ и 2 – $\zeta = 42$ мм

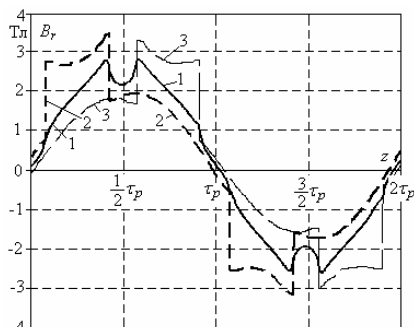


Рис. 7. Распределение магнитной индукции на средней линии по высоте: 1 – зазора, 2 – зубцов реактора и 3 – зубцов якоря в пределах двух полюсных делений при $\zeta = 0$

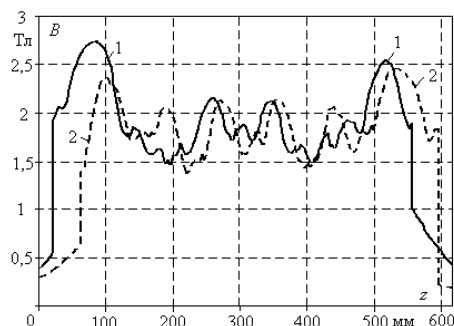


Рис. 8. Распределение модуля магнитной индукции на средних линиях в спинках сердечников реактора – 1 и якоря – 2 при $\zeta = 0$

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

На рис. 8 даны распределения модуля магнитной индукции вдоль аксиальных линий, которые проведе-

ны на среднем радиальном уровне спинки 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 считать с локальными всплесками индукции в угловых точках торцов сердечников, то можно констатировать, что на рассматриваемой поверхности магнитная индукция достигает примерно 0,5 Тл.

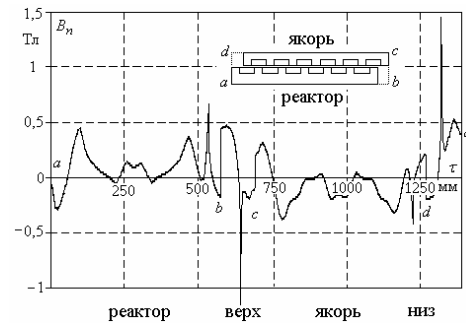


Рис. 9. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции на линиях по периметру поверхности сердечников ЛИЭД при $\zeta = 0$

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.

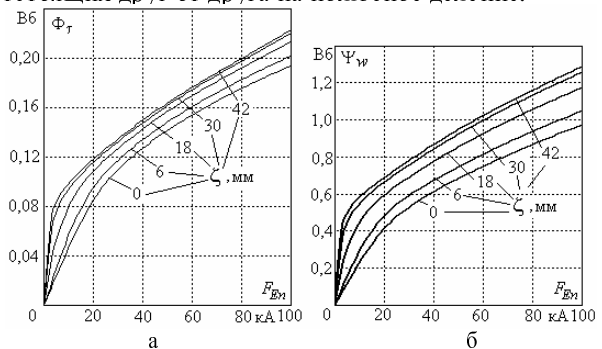


Рис. 11. Зависимости а) магнитного потока Φ_τ в зазоре на полюсном делении и б) магнитного потокосцепления обмоток Ψ_w от МДС F_{Eh} при разных положениях реактора ζ

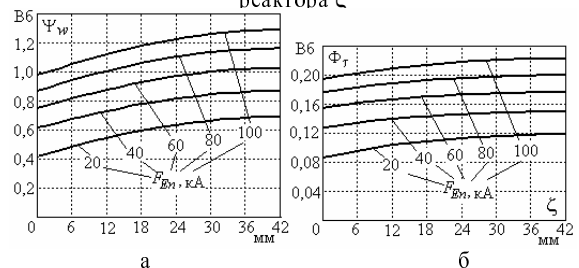


Рис. 12. Зависимости а) магнитного потока Φ_τ в зазоре на полюсном делении и б) магнитного потокосцепления обмоток Ψ_w от положений реактора ζ при разных МДС F_{Eh}

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

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

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 потокоцепление последовательно соединенных обмоток. Для обобщающей иллюстрации на рис. 11,б и рис. 12,б приводятся значения единичных магнитных потокоцеплений 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 положении при $\zeta = 0$ происходит примерно при МДС F_{En} , равной 20 кА, в конечном положении магнитопровод насыщается при значительно меньшей МДС. Зависимости Ψ_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.

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

$$k_\mu = F_\mu / F_\delta. \quad (5)$$

Очевидно, что при движении реактора этот коэффициент меняется весьма значительно и его крайние значения составили: $k_\mu = 3,1$ при $\zeta = 0$ и $k_\mu = 11,8$ при $\zeta = 42$ мм.

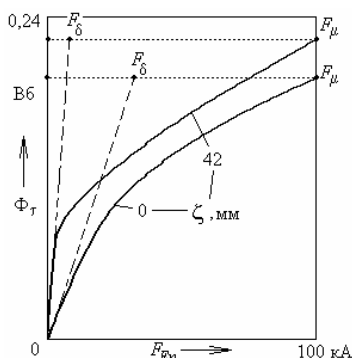


Рис. 13. К определению коэффициента насыщения магнитопровода

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:

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

где $A_{\Phi,z_{k+1}}$, A_{Φ,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 $F_{En} = 100$ 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.

Таблица 1

Магнитные потоки по длине ЛИЭД, Вб

Φ_{z_0,z_1}	Φ_{z_1,z_2}	Φ_{z_2,z_3}	Φ_{z_3,z_4}	Φ_{z_4,z_5}	Φ_{z_5,z_6}	Φ_{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 использования 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 реактора и якоря этого же полюсного деления. Их среднее магнитное потокоцепление 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 потокоцепление. Поэтому коэффициент эффективности использования магнитного потока:

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

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

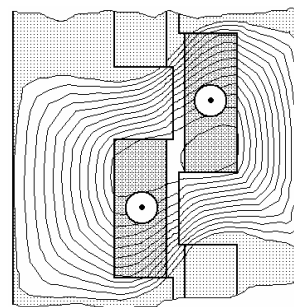


Рис. 15. К определению коэффициента использования магнитного потока

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 возникать 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 $2\pi r A_\phi = \text{const}$ в области расчета рис.16 при указанной МДС F_{En} 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 потокоцепление обмоток – 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.

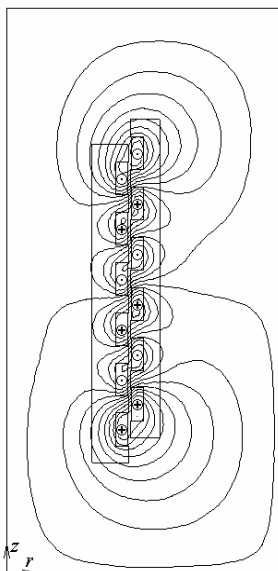


Рис. 16. Картина магнитного поля ЛИЭД при неферромагнитных сердечниках ($F_{En} = 100$ кА, $\zeta = 0$)

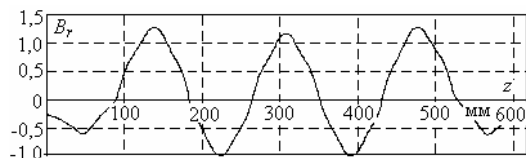


Рис. 17. Распределение радиальной составляющей магнитной индукции на средней линии зазора при МДС $F_{En} = 100$ кА и при $\zeta = 0$ для модели ЛИЭД без ферромагнитных сердечников

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 номи-

нальной 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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., Мильх В.И. Выбор типа и основных параметров линейного импульсного электродвигателя для невзрывных сейсмоисточников. // Электротехника і електромеханіка.-2008.-№3. - С. 41-44.
6. Мильх В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний. // Электротехніка і електромеханіка. - 2008. - №6. - С. 36-39.
7. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радионженеров 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. Мильх 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 03.11.08

Мильх Владимир Иванович, д.т.н., проф.

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 Сергей Валериевич

Открытое акционерное общество завод "Потенциал"

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