

УДК 621.313.17

В.И. Милых, профессор, С.В. Ткаченко, аспирант,
НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА В ЛИНЕЙНОМ ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ

Численными расчетами ударного режима работы линейного электродвигателя показана целесообразность использования в нем ферромагнитного сердечника, несмотря на его сильное насыщение.

An linear impulsive electric motor differs the cylindrical electromagnetic system and its strong magnetic saturation. Efficiency of ferromagnetic mandrels is exposed comparing to the variant, when they absent.

Ключевые слова: линейный импульсный электродвигатель, ферромагнитный сердечник, эффективность.

Keywords: linear impulsive electric motor, strong magnetic saturation, efficiency.

Введение. Исследуемый линейный импульсный электродвигатель (ЛИЭД) предназначен для возбуждения в земной коре слабых сейсмических колебаний. Это используется при поиске полезных ископаемых. Такой ЛИЭД представлялся в [1,2] и схематически показан на рис.1. Подвижные активные части – якорь 1 и реактор 2 состоят из коаксиальных шихтованных ферромагнитных сердечников и обмоток, уложенных в пазы. В соединенные последо-

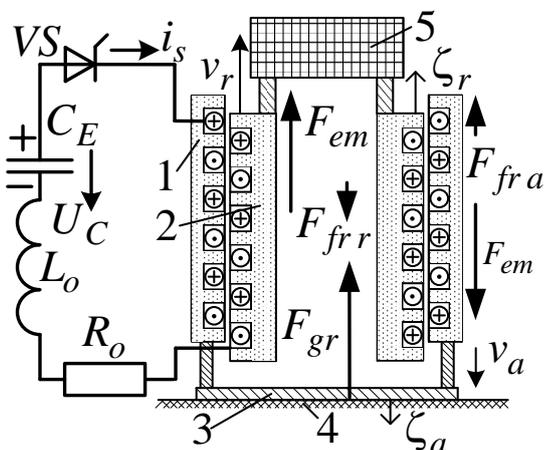


Рис. 1. Схема ЛИЭД

ательно обмотки поступают импульсы тока i_s от емкостного накопителя энергии C_E . Взаимодействие магнитных полей якоря и реактора порождает импульсы силы F_{em} [1]. Якорь движется вниз со скоростью v_a и через опорную плиту 3 импульс силы передается грунту 4, а реактор с инерционной массой 5 отскакивает вверх со скоростью v_r .

Постановка задачи исследования. В рабочем режиме ЛИЭД характеризуется высокими электромагнитными нагрузками: плотность тока в обмотках достигает 120 А/мм^2 , а в сильно насыщенных сердечниках магнитная индукция – $3..4 \text{ Тл}$. В таких условиях возникает вопрос, насколько целесообразно использование ферромагнитных сердечников вообще. Поэтому целью данной работы является определение эффективности ферромагнитных сердечников в ЛИЭД. Решение этой задачи достигается посредством сравнения параметров ЛИЭД в условиях импульсного режима работы при наличии и отсутствии ферромагнитных сердечников.

Математическая модель. Рабочий режим ЛИЭД описывается системой электромагнитно–механических уравнений

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \zeta} \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial \Psi}{\partial i_s} \frac{di_s}{dt} + (R_r + R_a + R_0) \cdot i_s + L_0 \frac{di_s}{dt} + \frac{1}{C_{E0}} \int i_s dt = U_{Co}; \quad (1)$$

$$F_{em} = m_r \left(\frac{d^2 \zeta_r}{dt^2} + g \right) + F_{frr}; \quad F_{em} = m_a \left(\frac{d^2 \zeta_a}{dt^2} - g \right) + F_{gr} + F_{fra}, \quad (2)$$

где ζ , ζ_r , ζ_a – взаимное и индивидуальные аксиальные смещения реактора и якоря; $\Psi(\zeta, i_s)$, $F_{em}(\zeta, i_s)$ – двухпараметрические функции суммарного магнитного потокосцепления (МПС) обмоток и силы взаимодействия реактора и якоря; t – время; m_r , m_a – массы реактора и якоря с элементами их конструкций; $R_r(\theta_r)$ и $R_a(\theta_a)$ – сопротивления обмоток реактора и якоря, зависящие от их температур; U_{Co} – начальное напряжение конденсатора; R_0 и L_0 – сопротивление и индуктивность кабелей; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $F_{gr}(\zeta_a)$ – функция упругой силы реакции грунта под опорной плитой; F_{frr} , F_{fra} – силы динамического трения реактора и якоря об их направляющие.

Эта модель была наполнена числовым содержимым и решена на ЭВМ численно-итерационно методом Рунге-Кутты IV порядка по составленной программе. При этом наиболее трудоемким оказалось оперирование с функциями $F_{em}(\zeta, i_s)$ и $\Psi(\zeta, i_s)$, которые были заранее подготовлены численно-полевыми расчетами при достаточно большом сочетании ζ и i_s (21×30). Частично эти зависимости про-

иллюстрированы на рис.2, где сплошные линии соответствуют варианту ЛИЭД с ферромагнитными сердечниками, пунктирные – без них; Ψ_w – МПС при одном витке на паз; $F_n = i_s N_n / a_p$ – МДС на один паз и якоря, и реактора; N_n – число витков в пазу; a_p – число параллельных ветвей обмоток. Значение $\zeta = 0$ соответствует положению, когда пазы находятся против зубцов, как на рис. 1.

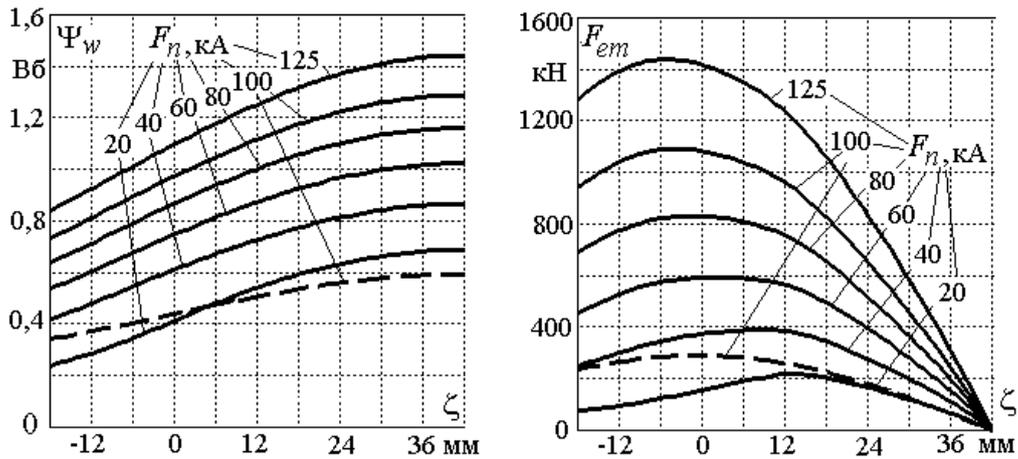


Рис.2. Зависимости $\Psi_w(\zeta)$ и $F_{em}(\zeta)$ при указанных значениях МДС F_n

Для линейного варианта расчеты были проведены при одном – базовом значении F_{nb} , а для других значений F_n при каждом значении ζ МПС и сила определялись через соотношение $f_n = F_n / F_{nb}$

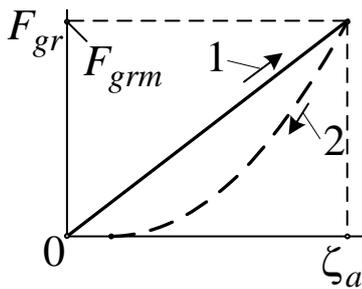


Рис. 3. Сила упругой реакции грунта

$$\Psi(\zeta) = \Psi_b(\zeta) \cdot f_n; F_{em}(\zeta) = F_{emb}(\zeta) \cdot f_n^2. \quad (3)$$

Для силы реакции грунта была принята представленная на рис.3 зависимость $F_{gr}(\zeta_a)$, где ζ_a является заглублением опорной плиты в грунт (рис.1). Прямому ходу соответствует линейная зависимость 1 и здесь сила F_{gr} достигает максимума F_{grm} , при обратном ходе (отскоке) – принята параболическая зависимость с остаточной деформацией грунта.

Результаты расчетов рабочего режима. Для общего представления о ЛИЭД (рис.1) упомянем некоторые его параметры: зазор между сердечниками реактора и якоря – 2 мм; диаметр по зазору – 416 мм; длина сердечников – 533 мм; $N_n = 14$; $a_p = 3$; $m_a = 750$ кг; $m_r = 1500$ кг; $U_{Co} = 1200$ В; $C_E = 0,085$ Ф.

Пример графиков ряда функций, характеризующих протекание переходного процесса, дан на рис.4 в относительных единицах (о.е.): а – с ферромагнитными сердечниками, б – без них.

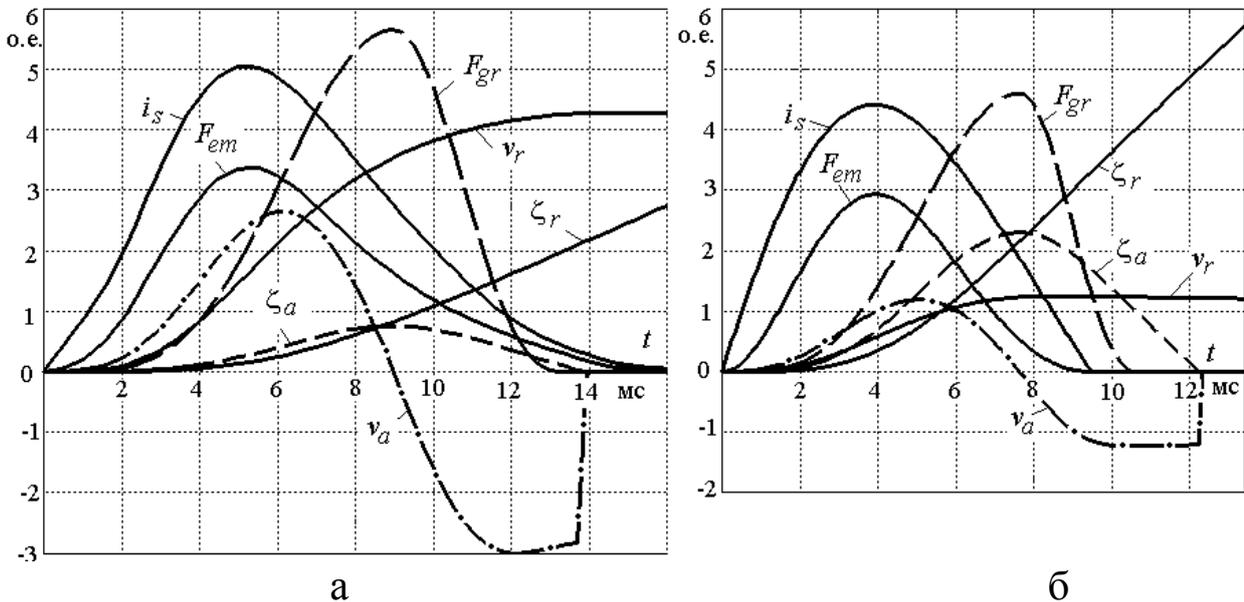


Рис.4. Временные функции, характеризующие работу ЛИЭД

Сравнение вариантов ЛИЭД проведено в табл.1, где I_{smax} , F_{emm} , F_{grm} , ζ_{am} – максимумы i_s , F_{em} , F_{gr} , ζ_a , a_{rm} , a_{am} – максимумы ускорений реактора и якоря. Даны также длительности импульсов тока i_s – t_{imi} , сил F_{em} – t_{ime} и F_{gr} – t_{img} .

Основная оценка эффективности работы ЛИЭД проводится по вырабатываемому импульсу силы и импульсу воздействия на грунт

$$S_{em} = \int_0^{t_{ime}} F_{em} dt; \quad S_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} dt, \quad (4)$$

где t_{img+} – время действия силы F_{gr} до того момента, пока якорь еще движется в грунт (т.е. на рис.4 пока еще $v_a > 0$).

Еще используется условный КПД ЛИЭД $\eta = W_{gr}/W_{el}$, где

$W_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} v_a dt$ – механическая энергия деформации грунта;

$W_{el} = 0,5 \cdot C_E (U_{Co}^2 - U_{Ck}^2)$ – отданная конденсатором электрическая энергия (U_{Ck} – остаточное напряжение).

В таблице первая строка данных – с ферромагнитными сердечниками при $U_{Co}=1200$ В, вторая – без сердечников, третья – тоже без сердечника, но при $U_{Co}=907$ В, что дает такое же значение I_{smax} , как и в первой строке.

Таблица 1 – Сравнение параметров вариантов ЛИЭД

I_{smax}	t_{imi}	F_{emm}	F_{grm}	S_{em}	t_{ime}	S_{gr}	t_{img}	ζ_{am}	a_{rm}	a_{am}	η
кА	мс	кН	кН	Н·с	мс	Н·с	мс	мм	м/с ²	м/с ²	-
20,2	13,7	1013	1699	6653	13,1	5510	9,4	11,3	665	1626	0,193
26,5	9,6	440	690	2007	8,1	2014	7,8	4,6	284	815	0,036
20,2	9,5	255	407	1165	8,0	1196	7,1	2,7	160	477	0,022

Данные таблицы явно показывают эффективность использования ферромагнитных сердечников, несмотря на то, что они оказываются очень сильно насыщенными.

Заметим, что полученные электросиловые параметры ударного режима ЛИЭД по значениям и характеру достаточно близки к соответствующим экспериментальным данным, измеренным на натурном образце ЛИЭД с ферромагнитными сердечниками.

Выводы. Проведенные исследования показывают, что использование ферромагнитных сердечников в ЛИЭД очень существенно повышает эффективность его работы как ударного источника сейсмических колебаний. Так, основной показатель – импульс силы воздействия на грунт S_{gr} увеличивается в 2,7 раза при одинаковом напряжении и в 4,6 раза при одинаковом максимуме тока, КПД увеличивается, соответственно, в 5,4 и 8,8 раза.

Список литературы

1. Милых В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // Электротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №6. – С.36-39.

2. Милых В.И., Ткаченко С.В. Математическая модель работы линейного импульсного электродвигателя для источника сейсмических колебаний // Тематичний випуск науково-технічного журналу «Електроінформ». – Львів: ЕКОінформ. – 2009. – С.282-284.