

**В.И.Милых, д-р техн. наук, С.В.Ткаченко**

(Украина, Харьков, НТУ «Харьковский политехнический институт»)

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ КАК ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

**Введение.** Схематически устройство линейного импульсного электродвигателя (ЛИЭД) представлено на рис. 1, а более полно описано в работах [1, 2].

ЛИЭД имеет подвижные активные части – якорь 1 и реактор 2, состоящие из коаксиальных цилиндрических шихтованных ферромагнитных сердечников и расположенных в пазах секционированных обмоток. Обмотки соединены последовательно и получают импульс тока  $i_s$  от емкостного накопителя энергии  $C_E$ . Взаимодействие магнитных полей якоря и реактора порождает смешанные силы электродинамического и электромагнитного происхождения  $F_{em}$  [1].

Под их воздействием якорь перемещается вниз со скоростью  $v_a$  и через опорную плиту 3 передает грунту 4 импульс силы, а реактор, усиленный инерционной массой 5, отскакивает вверх со скоростью  $v_r$ .

В результате в земной коре возникают слабые сейсмических колебания, отраженное эхо которых используется при поиске полезных ископаемых.

**Постановка задач исследования.** Анализ статических электромагнитных сил и полей в ЛИЭД проведен в работах [1, 2], математическая модель импульсного режима ЛИЭД, сопровождающегося совокупностью электромагнитных, механических, энергетических и тепловых процессов, в общем плане представлялась в работе [3], а в [4] уже осуществлен ее расчет. Все это позволяет перейти к анализу совокупности указанных его процессов и соответствующих параметров. Данная работа является очередным этапом в проводимом цикле исследований ЛИЭД [1-5] и ее целью является анализ влияния механических параметров ЛИЭД на эффективность его работы как ударного источника сейсмических колебаний.

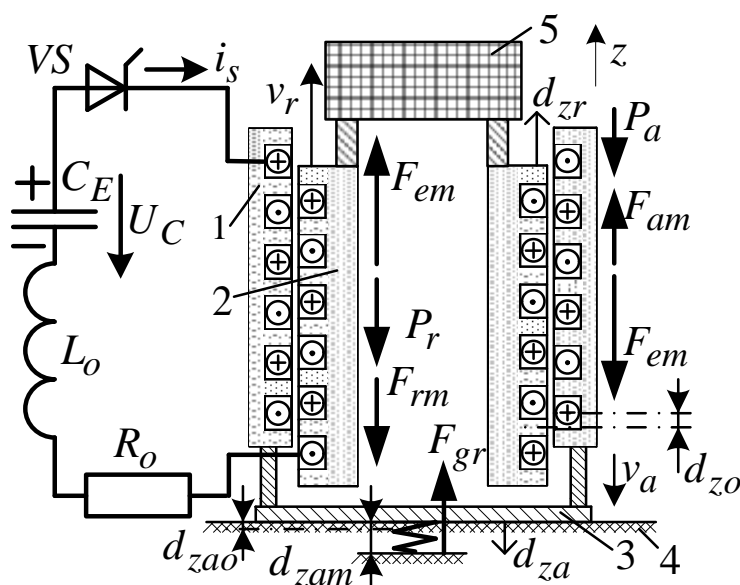


Рис. 1. Электросиловая схема ЛИЭД для определения времени действия ударного импульса

**Математическая модель.** Для адекватного восприятия решаемой задачи приведем основные уравнения, составляющие математическую модель ЛИЭД при его работе в ударном режиме, и представим его основные влияющие параметры.

Уравнение электрического равновесия для электрической цепи ЛИЭД имеет вид:

$$\frac{d\Psi(\zeta, i_s)}{dt} + (R_r(\theta) + R_a(\theta) + R_0) \cdot i_s(t) + L_0 \frac{di_s(t)}{dt} + \frac{1}{C_{E0}} \int_0^t i_s(t) dt = U_{Co}, \quad (1)$$

где  $\Psi$  – результирующее магнитное потокосцепление (МПС) обмоток;  $z(t)$  – взаимное аксиальное смещение реактора и якоря;  $R_r(q)$  и  $R_a(q)$  – сопротивления обмоток реактора и якоря, являющиеся функциями их температуры  $q$ ;  $R_0$  и  $L_0$  – сопротивление и индуктивность подводящих кабелей;

$U_{Co}$  – начальное значение напряжения конденсатора;  $t$  – время.

При итерационном расчете переходного процесса двухпараметрическая функция МПС и ее частные производные определялись на основе локальных аппроксимаций заранее подготовленной численно-полевыми расчетами табличной функции  $\Psi(z, i_s)$  кубическими полиномами по каждому из аргументов, что детально представлено в [5].

В уравнениях механической части математической модели ЛИЭД в рабочем интервале времени учитывались силы, показанные на рис. 1. Основной является упоминавшаяся уже движущая сила  $F_{em}(z, i_s)$ , которая, как и МПС, является двухпараметрической функцией и готовилась также численно-полевыми расчетами [1] при весьма большом количестве соотношений  $z$  и  $i_s$ .

На реактор и якорь действуют также силы их инерции  $F_{mr} = m_r a_r$  и  $F_{ma} = m_a a_a$ , а также их весовые силы  $P_r = m_r g_{gr}$  и  $P_a = m_a g_{gr}$ , где  $m_r$ ,  $m_a$  – полные массы реактора и якоря с учетом всех присоединенных элементов их конструкций;  $a_r$ ,  $a_a$  – ускорение движения реактора и якоря;  $g_{gr}$  – гравитационная постоянная.

К важнейшим силам относится еще сила реакции грунта  $F_{gr}$ . Для обеспечения расчетных условий ЛИЭД был принят ряд вариантов зависимости силы  $F_{gr}(d_{za})$  от осевого смещения якоря  $d_{za}$ , которое одновременно является заглублением опорной плиты в грунт (рис. 1). В исходном положении  $d_{za} = 0$ , а при ударном режиме работы имеет место максимальная деформация грунта  $d_{zam}$  (по опытным данным – порядка 10 мм). При этом  $F_{gr}$  достигает максимального значения  $F_{grm}$ , которое задается на основе тестовых расчетов ЛИЭД.

Гипотетические расчетные варианты реакции грунта представлены на рис.2. Вариант 0 на рис.2, а – абсолютно жесткий грунт без деформации, здесь же вариант 1 – линейная зависимость  $F_{gr}(d_{za})$  при прямом (удар) и обратном (отскок) ходах якоря; вариант 2 на рис.2, б – линейная зависимость при прямом

и параболическая – при обратном ходах; вариант 3 на рис.2, в – параболические зависимости при прямом и обратном ходах. В вариантах 1, 2 и 3 при обратном ходе в грунте остается остаточная деформация  $d_{zao}$ .

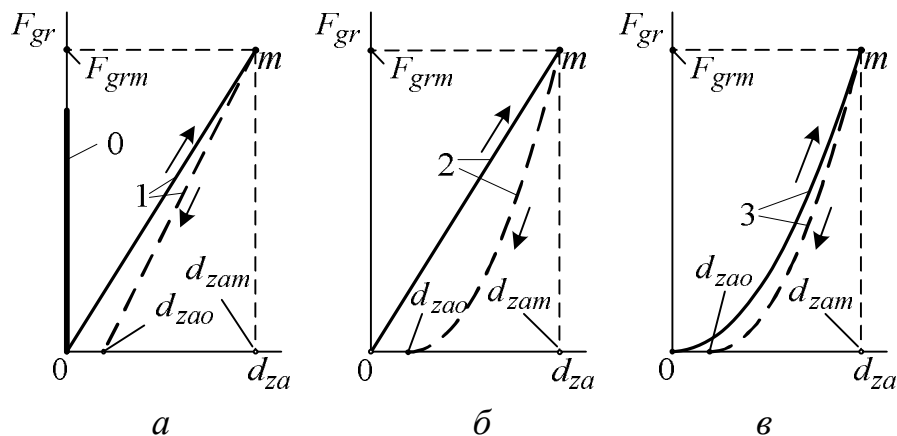


Рис. 2. Варианты функции упругой реакции грунта

С учетом указанных сил (другие силы по сравнению с ними пренебрежимо малы [4]) для интервала времени, соответствующего рабочему ходу, получаются ускорения движения реактора и якоря:

$$a_r = F_{em} / m_r - g_{gr}; \quad a_a = (F_{em} - F_{gr}) / m_a + g_{gr}. \quad (2)$$

При достижении условия  $a_r > 0$  с момента времени  $t_r$  начинает движение реактор, при  $a_a > 0$  с момента времени  $t_a$  движется якорь. Их скорости и собственные смещения в указанных на рис. 1 направлениях:

$$v_r = \int_{t_r}^t a_r dt; \quad v_a = \int_{t_a}^t a_a dt; \quad d_{zr} = \int_{t_r}^t v_r dt; \quad d_{za} = \int_{t_a}^t v_a dt. \quad (3)$$

Тогда определяется и взаимное смещение реактора и якоря  $x = d_{zr} + d_{za} + d_{zo}$ , куда входит важная величина  $d_{zo}$  (рис.1) – начальное смещение реактора из положения «нейтрали». В этом положении, когда середина нижнего паза сердечника реактора совпадает с серединой нижнего зубца сердечника якоря, принято, что  $x = 0$  и предполагается максимальное значение силы  $F_{em}$  [1].

**Расчетный анализ.** Представленная система уравнений – математическая модель рабочего импульса ЛИЭД, укомплектованная еще уравнениями нагрева обмоток и другими важными соотношениями и условиями [4], была решена численно методом Рунге-Кутты IV порядка по составленной программе на ЭВМ.

Для общего представления о конструкции ЛИЭД (рис. 1) упомянем следующие его параметры: зазор между сердечниками реактора и якоря – 2 мм; диаметр по средней линии зазора – 416 мм; длина сердечников – 533 мм; на паз

приходится МДС  $F_n = i_s N_n / a$ , где  $N_n = 14$  – число витков в пазу,  $a = 3$  – число параллельных ветвей обмоток; размеры паза  $55 \times 23$  мм<sup>2</sup>; начальное напряжение конденсатора  $U_{Co} = 1200$  В.

Пример графиков ряда функций, характеризующих протекание переходного процесса, дан на рис. 3 для конкретного сочетания параметров, из которых упомянем следующие:  $m_a = 750$  кг;  $m_r = 1500$  кг;  $d_{zo} = -12$  мм; реакция грунта по варианту 2 (рис.2, б).

Функции представлены в безразмерной форме, а для общей числовой оценки ударного рабочего режима ЛИЭД укажем максимумы некоторых из них: ток –  $I_{smax} = 20,2$  кА, сила  $F_{emm} = 1013$  кН, сила  $F_{grm} = 1699$  кН, скорости реактора и якоря  $v_{rm} = 4,28$  м/с и  $v_{am} = 2,65$  м/с; смещение якоря –  $d_{zam} = 15,7$  мм, а смещение реактора еще продолжается.

Отметим, что полученные электросиловые параметры рабочего ударного режима ЛИЭД по значениям и характеру изменения достаточно близки к соответствующим экспериментальным данным, измеренным на натурном образце ЛИЭД.

При оценке эффективности работы ЛИЭД за основу принимаются вырабатываемый им импульс силы и импульс силы 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  $t_{ime}$  – время действия силы  $F_{em}$ ;  $t_{img+}$  – время действия силы  $F_{gr}$  до того момента, пока якорь еще движется в грунт (т.е. на рис. 3 пока  $v_a > 0$ ).

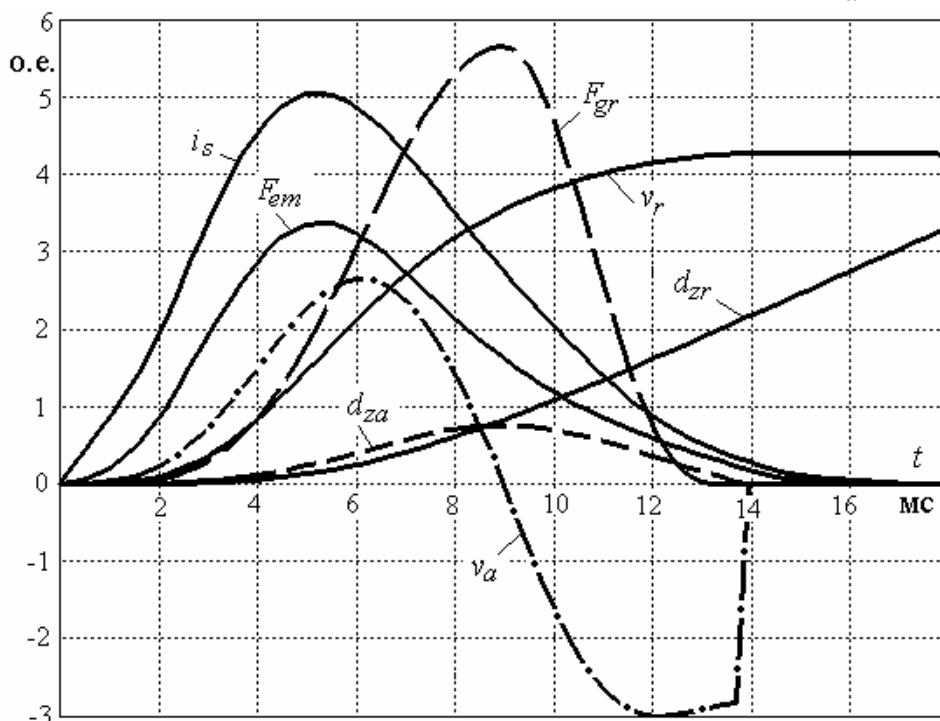


Рис.3. Временные функции величин, характеризующих работу ЛИЭД

Сравнение параметров ЛИЭД при указанных на рис. 2 вариантах реакции грунта дано в таблице, где, кроме уже представленных величин, даны  $t_{imi}$  – длительность импульса тока;  $t_{img}$  – полная длительность импульса силы  $F_{gr}$ . Обратим внимание, что величины  $I_{smax}$ ,  $t_{imi}$ ,  $F_{emm}$ ,  $t_{ime}$  и  $S_{em}$ , вырабатываемые ЛИЭД, зависят от варианта реакции грунта незначительно, а вот величины  $F_{grm}$ ,  $t_{img}$  и  $S_{gr}$ , характеризующие полезное воздействие на грунт, зависят существенно.

**Сравнение данных ЛИЭД при разных реакциях грунта**  
( $m_a=750$  кг,  $m_r=750$  кг,  $d_{zo}=-12$  мм)

Реакция грунта	$I_{smax}$ , кА	$t_{imi}$ , мс	$F_{emm}$ , кН	$t_{ime}$ , мс	$S_{em}$ , Н·с	$F_{grm}$ , кН	$t_{img}$ , мс	$S_{gr}$ , Н·с
0	22,2	12,4	1122	11,8	6889	1129	11,9	6993
1	20,2	13,9	1013	13,3	6634	1699	9,7	5520
2	20,2	13,7	1013	13,1	6606	1699	9,4	5520
3	19,9	14,1	994	13,5	6649	2549	6,8	4890

Варьирование массами реактора и якоря проведено при реакции грунта по варианту 2 и фиксированном значении  $d_{zo} = -12$  мм, а результаты представлены на рис. 4, а. Здесь условное значение  $m_r = \infty$  соответствовало неподвижному реактору (без отдачи). Очевидно, что с увеличением  $m_a$  импульс  $S_{em}$  несколько понижается, а вот импульс  $S_{gr}$  существенно увеличивается, приближаясь к  $S_{em}$ , а с увеличением  $m_r$  и вырабатываемый  $S_{em}$ , и полезный  $S_{gr}$  импульсы возрастают, приближаясь к пределу своих значений при  $m_r = \infty$ .

При некоторых средних значениях  $m_a = 750$  кг и  $m_r = 1500$  кг и той же реакции грунта были проведены расчеты при варьировании начальным смещением реактора из положения нейтралы  $d_{zo}$  (отрицательные значения указывают на смещение против дальнейшего движения). Результаты расчета на рис. 4, б показывают зависимости от  $d_{zo}$  максимальных значений сил ЛИЭД  $F_{emm}$  и реакции грунта  $F_{grm}$ , а также вырабатываемого  $S_{em}$ , и полезного  $S_{gr}$  импульсов сил. Очевиден максимальный эффект работы ЛИЭД по величине  $S_{gr}$  в диапазоне  $d_{zo}$ , составляющем 9–12 мм.

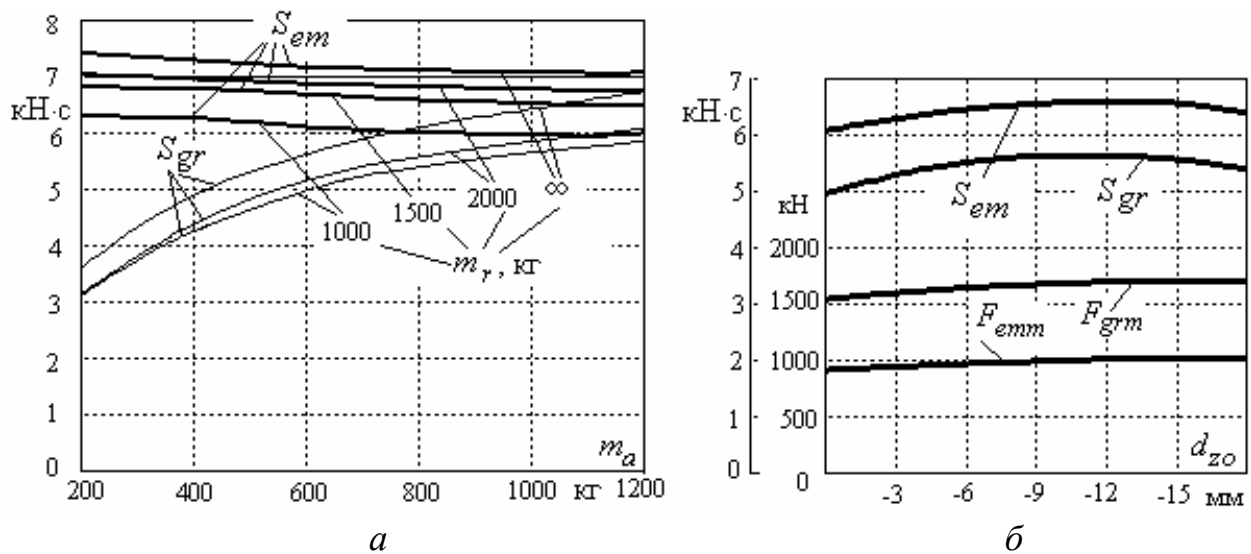


Рис. 4. Сравнение эффективности ЛІЭД при варьировании  $m_a$ ,  $m_r$  и  $d_{zo}$

**Выводы.** Проведенные исследования показывают, что разработанная методика расчета ударного рабочего режима ЛІЭД позволяет проводить количественную оценку эффективности его работы при варьировании его механическими параметрами и параметрами грунта. Этим проявляется, что наибольшей эффективности можно достичь при конкретных соотношениях таких параметров ЛІЭД, как массы якоря и реактора, а также начальное их взаимное расположение.

#### Список литературы

1. Милых В.И. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Электротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №6. – С.36-39.
2. Милых В.И. Анализ магнитного поля в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Электротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №2. – С.43-47.
3. Милых В.И. Математическая модель работы линейного импульсного электродвигателя для источника сейсмических колебаний / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Наук.-техн. журн. "ЕЛЕКТРОІНФОРМ" Тем. вип. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Львів: ЕКОінформ. – 2009. – С. 282-284.
4. Милых В.И. Анализ ударного режима работы линейного электродвигателя для источника сейсмических колебаний / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – №28. – С.443-445.
5. Милых В.И. Математическое обеспечение численного анализа импульсного возбуждения линейного электродвигателя с двухпараметрической функцией магнитного потокосцепления / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ. – 2010. – Вип.3/2010(62). Частина 2. –С.70-73.