

УДК 621.313.17

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ

В.И.Милых, профессор, д-р техн. наук, С.В.Ткаченко, аспирант
(НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина,
e-mail mvikpi@kpi.kharkov.ua, тел. +380577076514)

Представлена математическая модель линейного импульсного электродвигателя и проведен анализ влияния его электрических и механических параметров на эффективность его работы как ударного источника сейсмических колебаний при поиске полезных ископаемых.

Линейный импульсный электродвигатель, электрические и механические параметры, эффективность работы, сейсмические колебания

ANALYSIS OF INFLUENCING OF PARAMETERS OF LINEAR
IMPULSIVE ELECTRIC MOTOR ON EFFICIENCY OF HIS WORK

V.I. Milykh, prof., dr. of tech. sc., S.V. Tkachenko, post-graduate stud.
NTU “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, Ukraine,
E-mail mvikpi@kpi.kharkov.ua, tel. +380577076514)

The mathematical model of linear impulsive electric motor is presented and the analysis of influencing of his electric and mechanical parameters is conducted on efficiency of his work as a shock source of seismic vibrations at the search of minerals.

Linear impulsive electric motor, electric and mechanical parameters, analysis of influencing, seismic vibrations

Введение. Устройство линейного импульсного электродвигателя (ЛИЭД) схематически представлено на рис.1, а более полно – в [1,2]. Подвижные активные части – якорь 1 и реактор 2 состоят из цилиндрических ферромагнитных сердечников и расположенных в пазах секционирован-

ных обмоток. От емкостного накопителя энергии C_E в последовательно соединенные обмотки подается импульс тока i_s и взаимодействие магнитных полей якоря и реактора порождает силу F_{em} [1]. Она движет якорь вниз со скоростью v_a и через опорную плиту 3 грунту 4 передается импульс силы. В земной коре возникают слабые сейсмических колебания, эхо которых используется при поиске полезных ископаемых. Реактор, усиленный инерционной массой 5, отскакивает вверх со скоростью v_r .

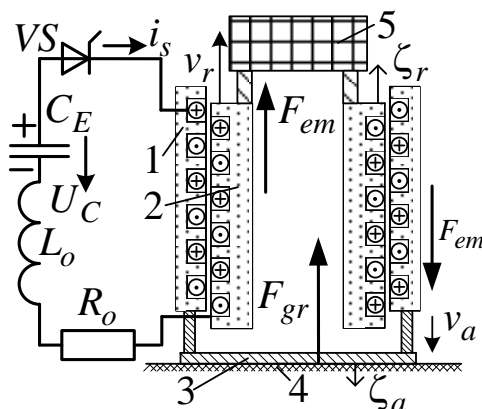


Рис. 1. Электросиловая схема ЛИЭД при действии ударного импульса

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

Математическая модель. Для адекватного восприятия решаемой задачи воспроизведем основные уравнения, составляющие математиче-

скую модель ЛИЭД при его работе в ударном режиме, и представим его основные влияющие параметры.

Уравнение равновесия для электрической цепи ЛИЭД имеет вид:

$$\frac{d\Psi(\zeta, i_s)}{dt} + [R_r(\theta_r) + R_a(\theta_a) + R_0] \cdot i_s(t) + L_0 \frac{di_s(t)}{dt} + \frac{1}{C_E} \int_0^t i_s(t) dt = U_{Co},$$

где Ψ – полное магнитное потокосцепление (МПС) обмоток; $\zeta(t)$ – взаимное аксиальное смещение реактора и якоря; $R_r(\theta_r)$ и $R_a(\theta_a)$ – сопротивления обмоток реактора и якоря, являющиеся функциями их температур θ_r и θ_a ; R_0 и L_0 – сопротивление и индуктивность подводящих кабелей; U_{Co} – начальное значение напряжения конденсатора; t – время.

При итерационном расчете переходного процесса частные производные двухпараметрической функции МПС $\Psi(\zeta, i_s)$ определялись на основе локальных аппроксимаций заранее подготовленной численно-полевыми расчетами [2] табличной функции $\Psi_w(\zeta, F_n)$ кубическими полиномами по каждому из аргументов, что детально представлено в [5]. Здесь Ψ_w – МПС обмоток при одном усредненном витке на паз; F_n – МДС на один паз.

В процессе расчета переходного процесса по находимым значениям тока i_s и смещения ζ определялись пазовая МДС и полное МПС

$$F_n = i_s \frac{N_n}{a_p}, \quad \Psi(\zeta, i_s) = k_{\Psi fh} \cdot \Psi_w(\zeta, F_n) \cdot \frac{N_n}{a_p}, \quad (1)$$

где N_n – число витков в пазу, a_p – число параллельных ветвей обмоток; $k_{\Psi fh}$ – коэффициент увеличения из-за наличия лобовых соединений.

В механической части математической модели ЛИЭД в рабочем интервале основной является упоминавшаяся уже движущая сила $F_{em}(\zeta, i_s)$, которая, как и МПС, является двухпараметрической функцией. Она готовилась также численно-полевыми расчетами [1] при весьма большом количестве соотношений ζ 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 еще весовые силы $P_r = m_r g_{gr}$ и $P_a = m_a g_{gr}$, где g_{gr} – гравитационная постоянная; m_r, m_a – массы реактора и якоря с учетом всех элементов их конструкций; a_r, a_a – ускорение движения реактора и якоря.

К важнейшим силам относится сила реакции грунта F_{gr} . В исходном положении осевое смещение якоря $\zeta_a = 0$, а в конце ударного импульса достигаются максимальная деформация грунта на ζ_{am} (около 10..15 мм) и максимум силы $F_{gr} = F_{grm}$, который задается на основе тестовых расчетов ЛИЭД. В этих пределах была принята гипотетическая зависимость $F_{gr}(\zeta_a)$. Для прямого хода якоря с углублением опорной плиты в грунт это линейная зависимость $F_{gr} = k_{res1} \zeta_a$, где коэффициент упругости грунта $k_{res1} = F_{grm} / \zeta_{am}$. После ослабления силы F_{em} упругая сила F_{gr} отбрасывает якорь и на обратном ходе принята параболическая функция $F_{gr} = k_{res2} (\zeta_a - \zeta_{ao})^2$ с частично необратимой деформацией грунта ζ_{ao} , где коэффициент упругости грунта $k_{res2} = F_{grm} / (\zeta_{am} - \zeta_{ao})^2$.

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:

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

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, собственные смещения в указанных на рис. 1 направлениях и взаимное смещение реактора и якоря:

$$v_r = \int_{t_r}^t a_r dt; \quad v_a = \int_{t_a}^t a_a dt; \quad \zeta_r = \int_{t_r}^t v_r dt; \quad \zeta_a = \int_{t_a}^t v_a dt; \quad \zeta = \zeta_r + \zeta_a + \zeta_o,$$

где ζ_o – начальное смещение реактора от положения «нейтралли», когда зубцы сердечников расположены против их пазов (рис.1) и принято $\zeta = 0$.

Представленная система уравнений дополняется еще уравнениями нагрева обмоток по аналогии с [6] и другими важными соотношениями и условиями [4] – полная математическая модель рабочего импульса ЛИЭД.

Расчетный анализ. Сформированная система уравнений решалась численно на ЭВМ на основе метода Рунге-Кутты IV порядка.

Для оценки уровня 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; $N_n = 14$ – число витков в пазу, $a_p = 3$ – число параллельных ветвей обмоток; $m_a = 750$ кг; $m_r = 1500$ кг; конденсатор имеет емкость $C_E = 0,085$ Ф и начальное напряжение $U_{Co} = 1200$ В, а также было принято $\zeta_o = -12$ мм (см. далее).

Графики ряда функций, характеризующих переходный процесс, даны на рис.2 для представленного базового сочетания параметров.

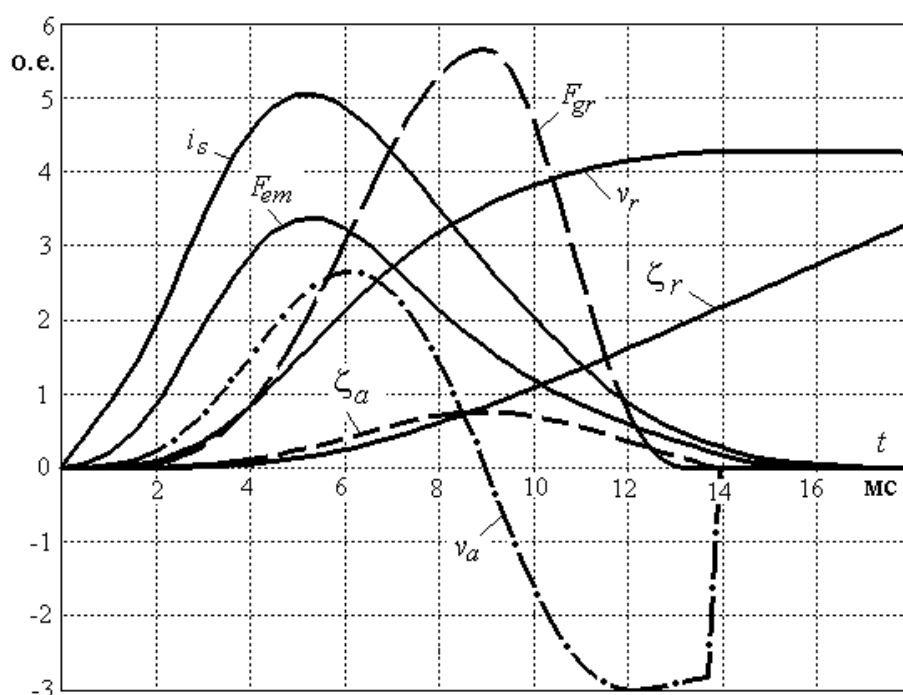


Рис.2. Временные функции величин, характеризующих работу ЛИЭД

Функции представлены в безразмерной форме, а для общей числовой оценки ударного рабочего режима ЛИЭД укажем максимумы некоторых из них: ток – $I_{sm}=20,2$ 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 – $\zeta_{am}=15,7$ мм, а смещение реактора еще продолжается.

При оценке эффективности работы ЛИЭД за основу принимаются вырабатываемый им импульс силы и импульс силы воздействия на грунт

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

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.2 пока $v_a > 0$).

Еще используется условный КПД работы ЛИЭД $\eta = \frac{W_{gr}}{W_{el}}$, 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 на конденсаторе.

Так, для базового ЛИЭД $S_{em}=6606$ Н·с; $S_{gr}=5520$ Н·с; $\eta=0,193$.

Варьирование массами реактора и якоря дало результаты, представленные на рис.3,а. Уровень $m_r = \infty$ соответствует 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} . С увеличением m_r и вырабатываемый S_{em} , и полезный S_{gr} импульсы сил возрастают, приближаясь к пределам при $m_r = \infty$.

Варьирование ζ_o проведено при базовых значениях параметров (отрицательные значения – смещение против дальнейшего движения) и про-

иллюстрировано на рис.3,б, где кроме импульсов сил S_{em} и S_{gr} даны максимумы сил ЛИЭД F_{emm} и реакции грунта F_{grm} . Видно, что максимальный эффект работы ЛИЭД по S_{gr} достигается при $\zeta_o = (-15 \dots -9)$ мм.

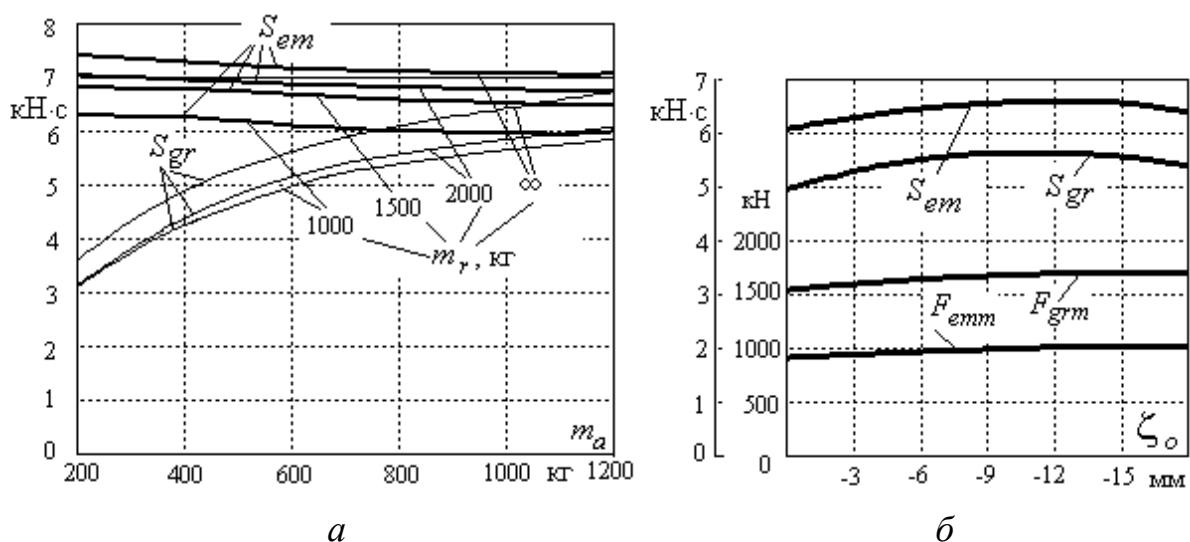


Рис.3. Сравнение эффективности ЛИЭД при варьировании m_a , m_r и ζ_o

Изменение выходных параметров ЛИЭД при варьировании числа параллельных ветвей a_p обмоток ЛИЭД представлено на рис.4. Отметим, что изменения a_p сопровождались изменениями МДС и МПС (1) и суммарного сопротивления цепи якоря и реактора $R_s = (R_{aw} + R_{rw})p \cdot N_n / a_p$, где R_{aw} , R_{rw} – сопротивления усредненных витков в пазу якоря или реактора.

Из рис.4 очевидно, что наибольшая эффективность работы ЛИЭД с точки зрения максимума S_{gr} достигается при $a_p = 3$, что и было принято в базовом варианте.

Результаты расчетов при варьировании U_{Co} и C_E представлены на рис.5 и рис.6, соответственно. Фактически здесь подтверждено ожидаемое наращивание выходных параметров ЛИЭД при увеличении запасаемой энергии $W_{elo} = 0,5 \cdot C_E U_{Co}^2$, но после расчетов это наращивание становится конкретным в числовой форме.

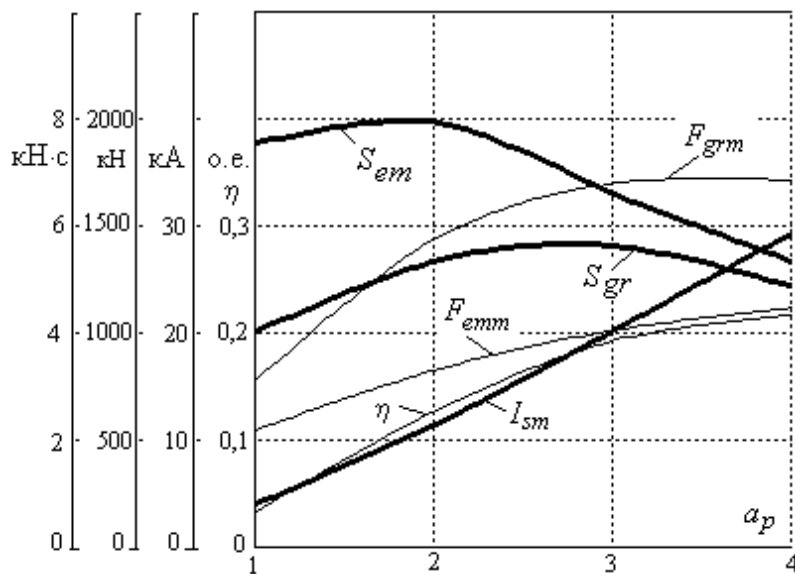


Рис.4. Варьирование числом параллельных ветвей

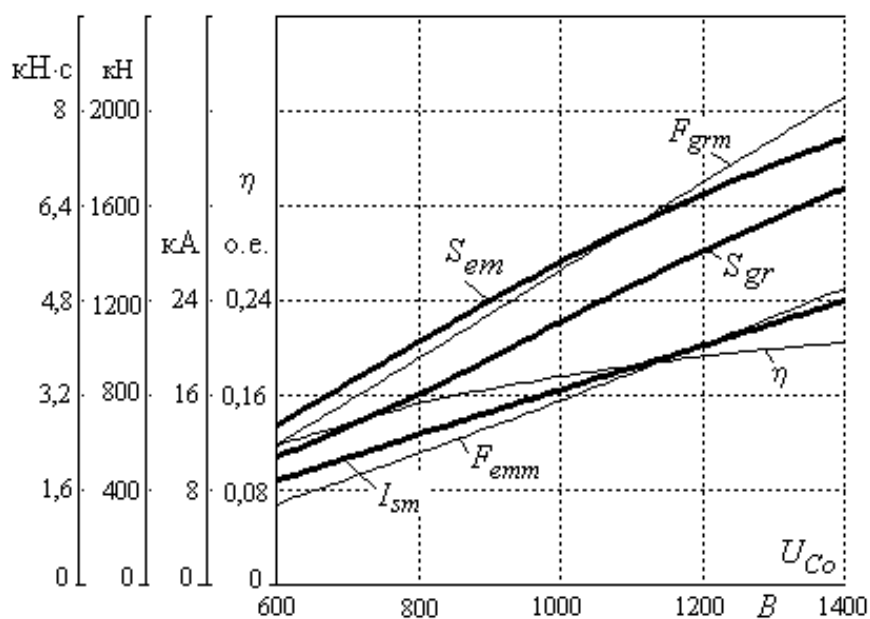


Рис.5. Варьирование напряжением зарядки конденсатора

Выводы. Проведенные исследования показывают, что разработанная методика расчета ударного рабочего режима ЛИЭД позволяет проводить количественную оценку эффективности его работы при варьировании его электрическими и механическими параметрами. Этим проявляется, что наибольшей эффективности можно достичь при конкретных соотношениях таких параметрах, как число параллельных ветвей обмоток, напряжение

заряда и емкость источника электропитания, массы и взаимное начальное расположение якоря и реактора, а также других интересующих проектанта параметров ЛИЭД.

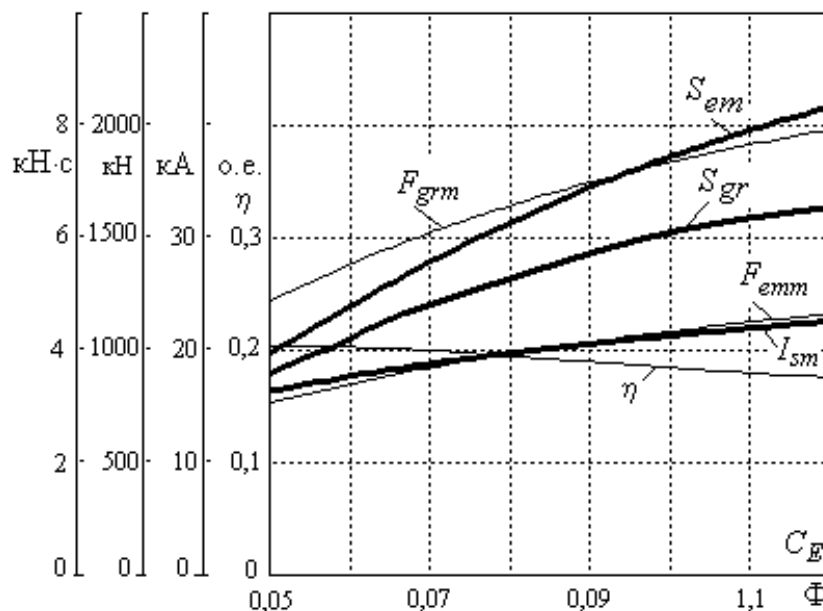


Рис.6. Варьирование емкостью конденсатора

Список литературы

1. Милых В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // Электротехника і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №6. – С.36-39.
2. Милых В.И., Ткаченко С.В. Анализ магнитного поля в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // Электротехника і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №2. – С.43-47.
3. Милых В.И., Ткаченко С.В. Математическая модель работы линейного импульсного электродвигателя для источника сейсмических колебаний // «Електроінформ». – Львів: ЕКОінформ. – 2009. – С.282-284.
4. Милых В.И., Ткаченко С.В. Анализ ударного режима работы линейного электродвигателя для источника сейсмических колебаний // Вест-

ник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – №28. – С.443-445.

5. Милых В.И., Ткаченко С.В. Математическое обеспечение численного анализа импульсного возбуждения линейного электродвигателя с двухпараметрической функцией магнитного потокоцепления // Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ. – 2010. – Вип.3/2010(62). Частина 2. –С.70-73.

6. Милых В.И. Исследование импульсного режима возбуждения линейного электродвигателя // Электротехника.– 1994.– №10.–С.3-9.