

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЙОГО РОБОТИ ЯК ДЖЕРЕЛА СЕЙСМІЧНИХ КОЛИВАНЬ

Мілих В.І., д.т.н., проф., Ткаченко С.В., асп.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Фрунзе, 21, 61002, м Харків, Україна

E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

Надана математична модель лінійного імпульсного електродвигуна. Виконано аналіз впливу його електричних параметрів на ефективність двигуна роботи як ударного джерела сейсмічних коливань при пошуку корисних копалин.

Ключові слова: лінійний електродвигун, електричні параметри, аналіз впливу, сейсмічні коливання.

Вступ. Досліджуваний лінійний імпульсний електродвигун (ЛЕД) подавався в [1–3] і схематично показаний на рис. 1. Його рухомі активні частини – якорі 1 і реактор 2 складаються з коаксіальних шихтованих феромагнітних осердь, в пази яких укладені секціоновані обмотки, що з'єднані послідовно. Ємнісний накопичувач енергії C_E живить їх імпульсами струму i_s , і взаємодія магнітних полів якоря і реактора породжує сили електродинамічного і електромагнітного характеру F_{em} [2]. Вони ударно переміщують якорі вниз зі швидкістю v_a , і через опорну плиту 3 імпульс сили передається ґрунту 4, а реактор разом з інерційною масою 5 відскакує вгору зі швидкістю v_r .

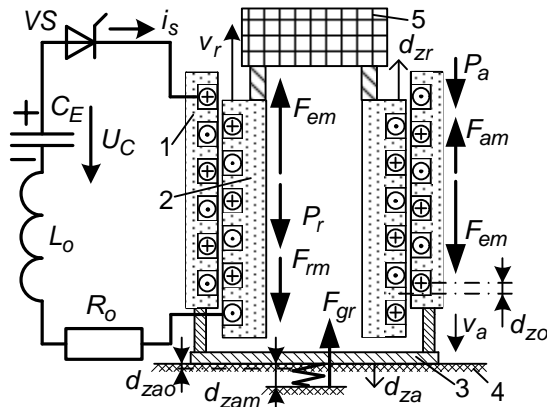


Рисунок 1 – Електросилова схема ЛЕД

У результаті в земній корі виникають слабкі сейсмічні коливання, а їхня відбита луна використовується при пошуку корисних копалин [4].

Аналіз попередніх досліджень. Статичний аналіз електромагнітних сил і полів у ЛЕД виконаний в [2, 3]. Математична модель імпульсного режиму ЛЕД, що описує сукупність електромагнітних, механічних, енергетичних і теплових процесів, подана в [5], а в [6] здійснена її розрахункова реалізація. Все це дозволяє перейти до аналізу сукупності його процесів і відповідних параметрів. Дана робота є черговим етапом досліджень ЛЕД [1–3, 5–7].

Мета роботи – аналіз впливу електричних параметрів ЛЕД на ефективність його роботи як ударного джерела сейсмічних коливань.

Матеріал і результати дослідження. Математична модель. Рівняння електричної рівноваги для ЛЕД має вигляд:

$$\frac{d\Psi(\zeta, i_s)}{dt} + (R_r(\theta) + R_a(\theta) + R_o) \cdot i_s(t) + L_o \frac{di_s(t)}{dt} + \frac{1}{C_E} \int_0^t i_s(t) dt = U_{C_0} \quad (1)$$

де Ψ – сумарне магнітне потокозчеплення (МПЗ) обмоток; $\zeta(t)$ – взаємний аксіальний зсув реактора і якоря; t – час; $R_r(\theta)$ і $R_a(\theta)$ – опори обмоток реактора і якоря, залежні від їхньої температури θ ; R_o і L_o – опір і індуктивність кабелів; U_{C_0} – початкова напруга конденсатора.

МПЗ $\Psi(\zeta, i_s)$ в (1) є нелінійною двопараметричною функцією, і її похідна розписується як

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{\partial\Psi}{\partial\zeta} \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial\Psi}{\partial i_s} \frac{di_s}{dt} \quad (2)$$

Вона складається з ЕРС руху $e_v = \frac{\partial\Psi}{\partial\zeta} \frac{d\zeta}{dt}$ і ЕРС самоіндукції $e_L = \frac{\partial\Psi}{\partial i_s} \frac{di_s}{dt}$, де $v_{ra} = \frac{d\zeta}{dt}$ – швидкість

відносного руху реактора і якоря; $L_{dif} = \frac{\partial\Psi}{\partial i_s}$ – диференціальна індуктивність кола обмоток.

При ітераційному розрахунку перехідного процесу часткові похідні двопараметричної функції МПЗ $\Psi(\zeta, i_s)$ визначалися на основі локальних апроксимацій наперед підготовленої чисельно-польовими розрахунками [3] табличної функції $\Psi_w(\zeta, F_n)$ кубічними поліномами за кожним з аргументів, що детально подано в [8]. Тут Ψ_w – МПЗ у випадку, якщо на один паз доводиться один виток; F_n – МРС на один паз.

У процесі розрахунку перехідного процесу за знайденими значеннями струму i_s і зсуву ζ визначалися пазові МРС

$$F_n = i_s \frac{N_n}{a_p} \quad (3)$$

а потім і повне МПЗ

$$\Psi(\zeta, i_s) = k_{\Psi fh} \cdot \Psi_w(\zeta, F_n) \cdot \frac{N_n}{a_p}, \quad (4)$$

де N_n – кількість витків в пазу, a_p – кількість паралельних віток обмоток; $k_{\Psi fh}$ – коефіцієнт збільшення МПЗ через наявність лобових з'єднань між котушками пазів.

У механічній частині математичної моделі в робочому інтервалі часу ЛПЕД враховувалися сили, наведені на рис. 1.

Рушійною є згадувана вже сила $F_{em}(\zeta, F_n)$, яка теж є двопараметричною функцією і готується чисельно-польовими розрахунками [2] при великій кількості співвідношень ζ і i_s (21×30).

На реактор і яркі діють також сили їхньої інерції $F_{mr} = m_r a_r$ і $F_{ma} = m_a a_a$, а ще ваги $P_r = m_r g_{gr}$ і $P_a = m_a g_{gr}$, де m_a – маси реактора і ярка з елементами їхніх конструкцій; a_r , a_a – прискорення руху реактора і ярка; g_{gr} – гравітаційна постійна.

До найважливіших сил належить ще сила реакції ґрунту F_{gr} . Її гіпотетичні варіанти розглянуто в [7]. Тут з них, як і в [6], прийнята подана на рис.2 залежність сили $F_{gr}(d_{za})$ від осьового зсуву ярка. Величина d_{za} одночасно є заглибленням опорної плити в ґрунт (рис. 1). Функція реакції ґрунту (рис. 2) – лінійна залежність $F_{gr}(d_{za})$ при прямому 1 і параболічна при зворотному 2 ходах, причому в ґрунті має місце залишкова деформація d_{zao} . У початковому положенні $d_{za} = 0$, а при ударному режимі роботи має місце максимальна деформація ґрунту d_{zam} (за дослідними даними – близько 10..15 мм). При цьому F_{gr} сягає максимального значення, яке задається на основі тестових розрахунків ЛПЕД.

З урахуванням указаних сил (інші сили [5] порівняно з ними вельми малі) для інтервалу часу, відповідного робочому ходу, знаходяться прискорення руху реактора і ярка:

$$a_r = F_{em} / m_r - g_{gr}; \quad a_a = (F_{em} - F_{gr}) / m_a + g_{gr}. \quad (5)$$

Досягши умови $a_r > 0$, з моменту часу t_r починає рухатися реактор, а при $a_a > 0$ з моменту часу t_a рухається яркі. Їхні швидкості і власні зсуви в указаних на рис. 1 напрямках:

$$v_r = \int_{t_r}^t a_r dt; \quad v_a = \int_{t_a}^t a_a dt; \quad (6)$$

$$d_{zr} = \int_{t_r}^t v_r dt; \quad d_{za} = \int_{t_a}^t v_a dt. \quad (7)$$

Тоді визначається і взаємний зсув реактора і ярка $\zeta = d_{zr} + d_{za} + d_{zo}$, куди входить важлива величина d_{zo} (рис.1) – початковий зсув реактора з положення «нейтралі». У цьому положенні, коли середина нижнього паза осердя реактора співпадає з серединою нижнього зубця осердя ярка, прийнято,

що $\zeta = 0$ і очікується максимальне значення сили F_{em} [1, 2].

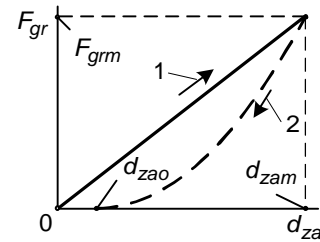


Рисунок 2 – Функція пружної реакції ґрунту

Параметри базового варіанту. Представлена система рівнянь – математична модель робочого імпульсу ЛПЕД, яка укомплектована ще рівняннями нагріву обмоток і іншими важливими співвідношеннями і умовами [5, 6], була розв'язана чисельно методом Рунге-Кутта IV порядку за складеною програмою на ЕОМ.

Для уявлення про ЛПЕД (рис. 1) згадаємо наступні його параметри для вихідного – базового варіанту: проміжок між осердями реактора і ярка – 2 мм; діаметр по середній лінії проміжку – 416 мм; довжина осердь – 533 мм; кількість пазів $p = 6$, максимальне розрахункове значення МРС $F_{nN} = 100$ кА; $N_n = 14$; $a_p = 3$; розміри паза 55×23 мм²; $m_a = 750$ кг; $m_r = 1500$ кг; ємність конденсатора $C_E = 0,085$ Ф; $U_{Co} = 1200$ В. За умови досягнення максимального ефекту було розрахунковим шляхом визначено $d_{zo} = -12$ мм [7].

Приклад графіків функцій, які характеризують протікання перехідного процесу, поданий на рис. 3 і 4 для базового варіанту ЛПЕД.

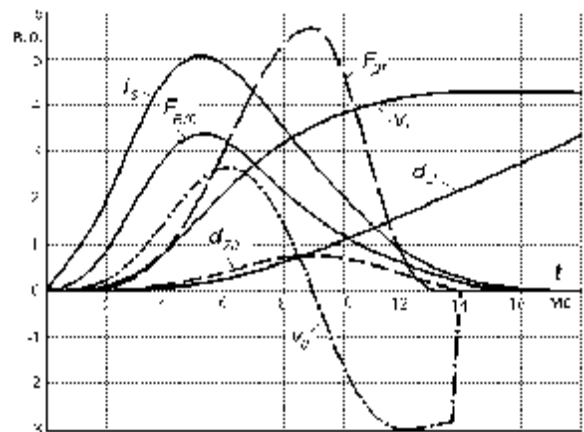


Рисунок 3 – Часові функції механічних величин

Функції подані у відносних одиницях (в.о.), але для числової оцінки дамо їхні максимуми: струм $i_s - I_{smax} = 20,2$ кА, густина струму в обмотках сягає 127 А/мм²; сила $F_{em} - F_{emm} = 1013$ кН, сила $F_{gr} - F_{grm} = 1699$ кН, швидкості реактора $v_r - v_{rm} = 4,28$ м/с і ярка $v_a - v_{am} = 2,65$ м/с; зсув ярка $d_{za} - d_{zam} = 15,7$ мм; зсув d_{zr} реактора ще продовжується-

ся; $L_{dif} - L_{difm} = 3,68$ мГн; $U_C - U_{Co} = 1200$ В; $e_v - e_{vmax} = 307$ В; $e_L - e_{Lmax} = 1200$ В.

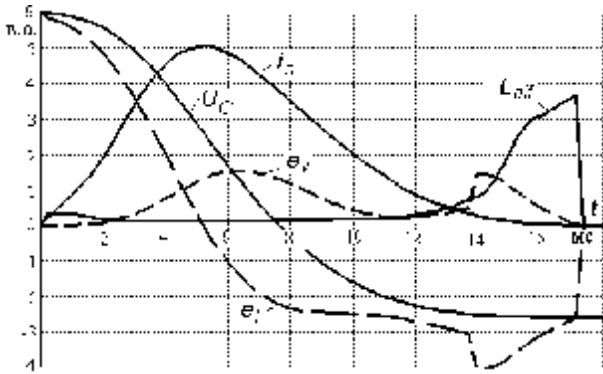


Рисунок 4 – Часові функції електричних величин

Визначення тривалості імпульсів зі зрізом початкового і кінцевого шлейфів дало для струму $i_s - t_{imi} = 13,7$ мс; для сили $F_{em} - t_{ime} = 13,1$ мс; для сили $F_{gr} - t_{img} = 9,4$ мс.

Важливо, що отримані параметри ударного режиму ЛПЕД за значеннями і характером достатньо близькі до відповідних експериментальних даних, зміряних на натурному зразку ЛПЕД [1].

Розрахунковий аналіз ефективності ЛПЕД. Щоб проявити, наскільки електричні параметри ЛПЕД впливають на ефективність його роботи, зроблений аналіз його вихідних параметрів при варіюванні наступними входними параметрами: U_{Co} , C_E , a_p , сумою опорів обмоток якоря і реактора R_s , рівнем МПЗ обмоток Ψ_w . При варіюванні однієї з величин інші залишалися такими, як для базового варіанту.

Для оцінки ефективності роботи ЛПЕД за основу беруться імпульс сили, що виробляється ним, і імпульс сили дії на ґрунт

$$S_{em} = \int_0^{t_{ime}} F_{em} dt; \quad S_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} dt, \quad (8)$$

де t_{ime} – тривалість імпульсу сили F_{em} ; t_{img+} – час дії сили F_{gr} до того моменту, поки якір ще рухається в ґрунт (на рис. 3 поки $v_a > 0$).

У [9, 10] показано, що амплітуда порушуваних у ґрунті пружних коливань пропорційна саме імпульсу сили. Ще для оцінки ЛПЕД використовуватимемо згадані вище максимальні значення величин I_{smax} , F_{emm} і F_{grm} .

Додатково покажемо деякий умовний ККД роботи ЛПЕД [5, 7]

$$\eta = \frac{W_{gr}}{W_{el}}, \quad (9)$$

який визначається за механічною енергією деформації ґрунту $W_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} v_a dt$ і електричною енер-

гією $W_{el} = 0,5 \cdot C_E (U_{Co}^2 - U_{Ck}^2)$, що віддана конденсатором, де U_{Ck} – залишкова напруга.

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

Зміна вихідних параметрів ЛПЕД при варіюванні a_p подана графічно на рис. 5. Зазначимо, що при зміні a_p відбувалися супутні зміни величин за (3), (4), а також сумарного опору кола якоря і реактора

$$R_s = (R_{aw} + R_{rw}) \frac{p \cdot N_n}{a_p}, \quad (10)$$

де R_{aw} , R_{rw} – опори усереднених витків в пазу якоря і реактора.

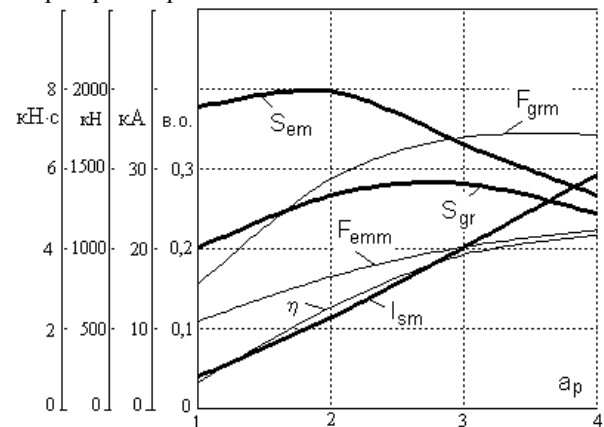


Рисунок 5 – Порівняння ефективності ЛПЕД при варіюванні кількості паралельних витків

Результати розрахунків при варіюванні U_{Co} і C_E подані на рис. 6 і 7, відповідно.

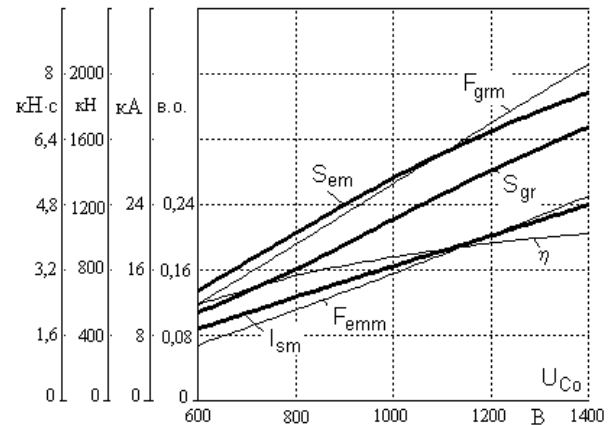


Рисунок 6 – Порівняння ефективності ЛПЕД при варіюванні напругою зарядки конденсатора

Варіювання опором і МПЗ проведено щодо їхніх базових значень із використанням безрозмірних коефіцієнтів

$$R_{svar} = k_R R_s; \quad \Psi_{wvar} = k_\Psi \Psi_w, \quad (11)$$

а результати розрахунків дані на рис. 8 і 9.

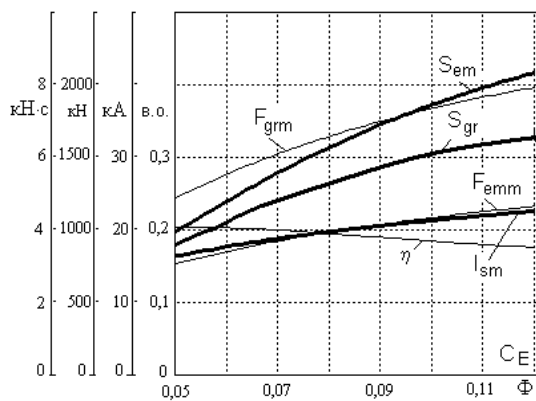


Рисунок 7 – Порівняння ефективності ЛПД при варіюванні ємністю конденсатора

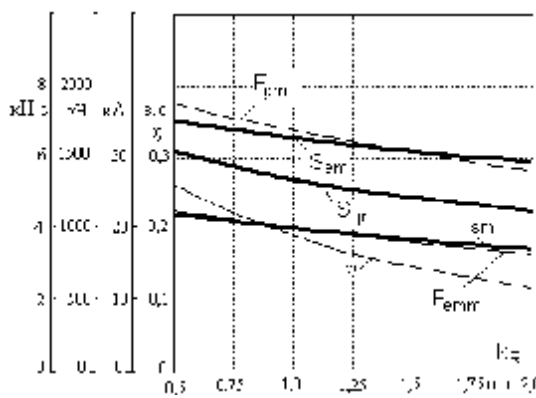


Рисунок 8 – Порівняння ефективності ЛПД при варіюванні опором обмоток

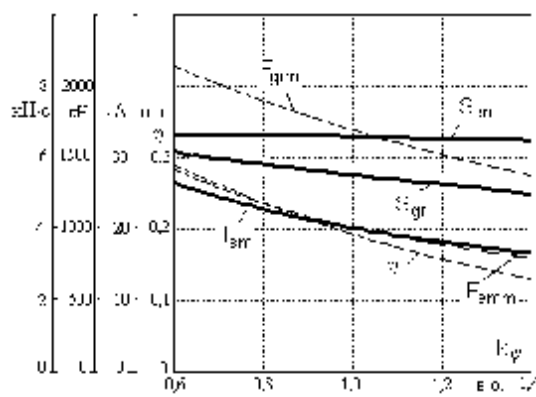


Рисунок 9 – Порівняння ефективності ЛПД при варіюванні МПЗ обмоток

Висновки. Виконані дослідження показують, що запропонована методика розрахунку ударного робочого режиму ЛПД дозволяє проводити кількісну оцінку ефективності його роботи при варіюванні його електричними параметрами. Таким чином виявляється, що найбільшій ефективності можна досягти при конкретних значеннях таких параметрів ЛПД, як кількість паралельних віток обмоток, напруга заряду і ємність джерела електроживлення, опір обмоток і магнітні властивості системи ЛПД.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бару Ю.А. Линейные импульсные электродинамические двигатели для невзрывных источников сейсмических колебаний / Ю.А. Бару, А.К. Мельник, В.П. Ткаченко и др. // Вестник Национального

технического университета «ХПИ». Тематический выпуск «Электроэнергетика и преобразовательная техника». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – № 38. – С. 83–92.

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

3. Милых В.И. Анализ магнитного поля в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Электротехника і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПИ», 2009. – № 2. – С. 43–47.

4. Невзрывные источники сейсмических колебаний. Справочник / Под ред. М.Б. Шнеерсона. – М.: Недра. – 1992.

5. Милых В.И. Алгоритмизированная математическая модель линейного импульсного электродвигателя как ударного источника слабых сейсмических колебаний / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Электротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 1. – С. 33–38.

6. 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.

7. Милых В.И., Ткаченко С.В. Анализ влияния механических параметров линейного электродвигателя на эффективность его работы как источника сейсмических колебаний // Электроинформ. – Львів: ЕКОінформ, 2010. – № 4. – С. 10–12.

8. Милых В.И. Математическое обеспечение численного анализа импульсного возбуждения линейного электродвигателя с двухпараметрической функцией магнитного потока сцепления / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ. – 2010. – Вип. 3/2010(62), част. 2. – С. 70–73.

9. Райхер Л.Д. К вопросу о выборе оптимальных параметров импульсных излучателей колебаний электродинамического типа // Вопросы методики и техники геофизических исследований. – Вып. 2. – М.: ВИЭМС, 1970.

10. Роман В.И., Геккер С.М., Гонтовой и др. Влияние длительности воздействия на сейсмическую эффективность импульсных электродинамических источников упругих колебаний // В кн. «Вибросейсмические методы исследования Земли. Материалы Всесоюзной конференции». – Новосибирск, 1982.

Стаття надійшла 10.03.2011 р.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Прусом В.В.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЙОГО РОБОТИ ЯК ДЖЕРЕЛА СЕЙСМІЧНИХ КОЛІВАНЬ

Милых В.И., д.т.н., проф., Ткаченко С.В., асп.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

ул. Фрунзе, 21, 61002, Харьков, Украина

E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

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

Ключевые слова: линейный электродвигатель, электрические параметры, анализ влияния, сейсмические колебания.

ANALYSIS OF INFLUENCING OF ELECTRIC PARAMETERS OF LINEAR ELECTRIC MOTOR ON EFFICIENCY OF ITS WORK AS SOURCE OF SEISMIC VIBRATIONS

Milykh V., Dr. of Sc. (Tech.), Prof., Tkachenko S., post-grad..

National technical university "Kharkov polytechnic institute"

vil. Frunze, 21, 61002, Kharkov, Ukraine

E-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

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

Key words: linear impulsive electric motor, electric parameters, analysis of influencing, seismic vibrations