

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

Analysis of influencing of electric parameters of linear electric motor on efficiency of his work as source of seismic vibrations

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

linear impulsive electric motor, electric parameters, analysis of influencing, seismic vibrations

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

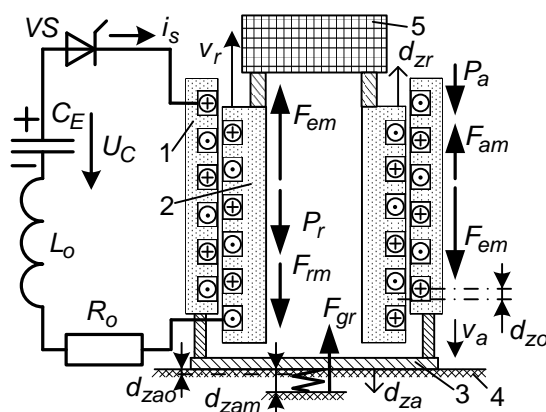


Рис. 1. Електросилова схема ЛІЕД

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

Постановка завдань дослідження. Статичний аналіз електромагнітних сил і полів в ЛІЕД виконаний в [2,3]. Математична модель імпульс-

ного режиму ЛІЕД, 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 ЛІЕД [1-3,5,6] і її **мета** – аналіз впливу його електричних параметрів на ефективність роботи як ударного джерела сейсмічних коливань.

Математична модель. Рівняння електричної рівноваги для ЛІЕД має вигляд:

$$\frac{d\Psi(\zeta, i_s)}{dt} + (R_r(\theta) + R_a(\theta) + R_0) \cdot i_s(t) + L_0 \frac{di_s(t)}{dt} + \frac{1}{C_E} \int i_s(t) dt = U_{C0} \quad (1)$$

де Ψ – сумарне магнітне потокозчеплення (МПЗ) обмоток; $\zeta(t)$ – взаємний аксіальний зсув реактора і ярміра; t – час; $R_r(\theta)$ і $R_a(\theta)$ – опори обмоток реактора і ярміра, залежні від їхньої температури θ ; R_0 і L_0 – опір і індуктивність кабелів; U_{C0} – 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 ярміра;

$L_{diff} = \frac{\partial\Psi}{\partial i_s}$ – 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 по кожному з аргументів, що детально подане в [7]. Тут Ψ_w – МПЗ у випадку, якщо на один паз доводиться один виток; F_n – МРС на один паз.

В 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 ЛІЕД враховувалися сили, подані на рис.1.

Рушійною є згадувана вже сила $F_{em}(\zeta, F_n)$, яка теж є двопараметричною функцією і готується чисельно-польовими розрахунками [1] при великій кількості співвідношень ζ і i_s (21×30).

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

До найважливіших сил відноситься ще сила реакції ґрунту F_{gr} . Для розрахунків ЛІЕД в [6] була прийнята подана на рис.2 залежність сили $F_{gr}(d_{za})$ від осьового зсуву якоря, який одночасно є заглибленням опорної плити в ґрунт (рис.1). Гіпотетичний варіант реакції ґрунту – 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 ЛІЕД.

З урахуванням вказаних сил (інші сили [5,6] порівняно з ними вельми малі) для інтервалу часу, відповідного робочому ходу, знаходяться прискорення руху реактора і якоря:

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

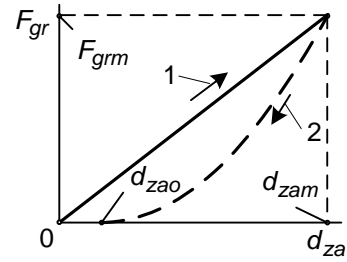


Рис. 2. Функція пружної реакції ґрунту

Досягши умови $a_r > 0$, з моменту часу t_r починає рухатися реактор, а при $a_a > 0$ з моменту часу t_a рухається якорь. Їхні швидкості і власні зсуви у вказаних 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 якоря $\zeta = d_{zr} + d_{za} + d_{zo}$, куди входить важлива величина d_{zo} (рис.1) – початковий зсув реактора з положення «нейтралі». У цьому положенні, коли середина нижнього пазу осердя реактора співпадає з серединою нижнього зубця осердя якоря, прийнято, що $\zeta = 0$ і очікується максимальне значення сили F_{em} [1,2].

Параметри базового варіанту. Представлена система рівнянь – математична модель робочого імпульсу ЛІЕД, 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 ЛІЕД (рис.1) згадаємо наступні його параметри для вихідного – базового варіанту: проміжок між осердями реактора і якоря – 2 мм; діаметр по середній лінії проміжку – 416 мм; довжина осердя – 533 мм; кількість пазів $p=6$, максимальне розрахункове значення МРС $F_{nN} = 100$ кА; $N_n = 14$; $a_p = 3$; розміри пазу 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.

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

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 якоря $v_a - v_{am} = 2,65$ м/с; зсув якоря $d_{za} - d_{zam} = 15,7$ мм; зсув d_{zr} реак-

тора ще продовжується; L_{dif} – час дії сили F_{gr} до того моменту, поки якір ще рухається в ґрунт (на рис.3 поки $v_a > 0$).
 $L_{difm} = 3,68$ мГн; $U_C - U_{Co} = 1200$ В; $e_v - e_{vmax} = 307$ В; $e_L - e_{Lmax} = 1200$ В.

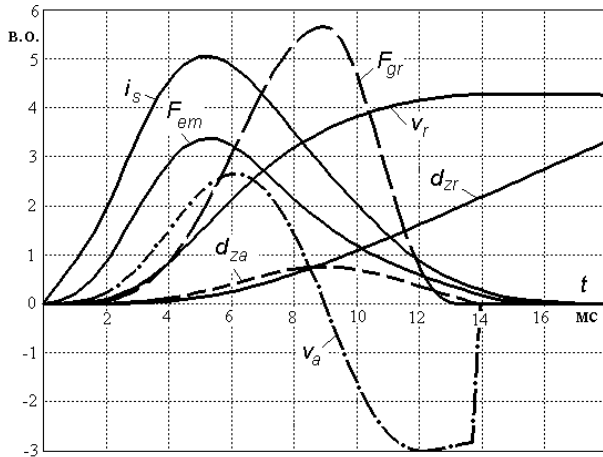


Рис.3. Часові функції механічних величин

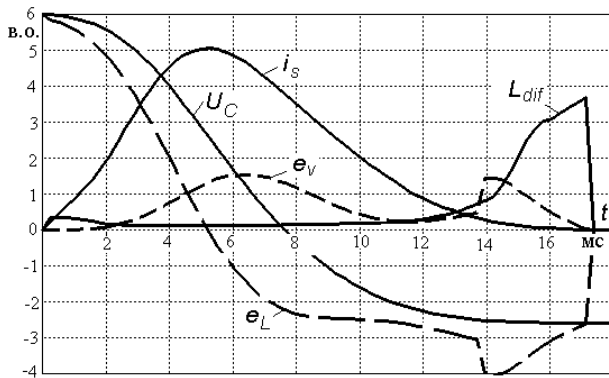


Рис.4. Часові функції електричних величин

Визначення тривалості імпульсів із зрізом початкового і кінцевого шлейфів дало для струму $i_s - t_{im1} = 13,7$ 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 ЛІЕД за значеннями і характером достатньо близькі до відповідних експериментальних даних, зміряних на натурному зразку ЛІЕД [1].

Розрахунковий аналіз ефективності ЛІЕД. Щоб проявити, наскільки електричні параметри ЛІЕД впливають на ефективність його роботи, зроблений аналіз його вихідних параметрів при варіюванні наступними вхідними 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 всі інші залишалися такими, які дані для базового варіанту.

Для оцінки ефективності роботи ЛІЕД за основу беруться імпульси 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 [8, 9] показано, що амплітуда порушуваних в ґрунті пружних коливань пропорційна саме імпульсу сили.

Ще для оцінки ЛІЕД використовуватимемо згадані вище максимальні значення величин I_{smax} , F_{emm} і F_{grm} .

Додатково покажемо деякий умовний ККД роботи ЛІЕД

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

який визначається за механічною енергією де-

формації ґрунту $W_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} v_a dt$ і електричною

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

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

Зміна вихідних параметрів ЛІЕД 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.

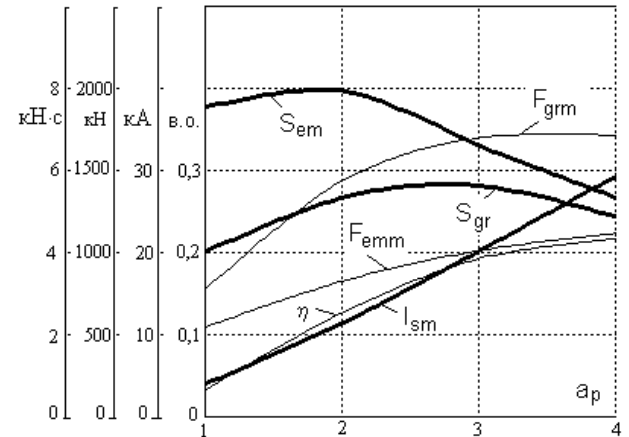


Рис.5. Порівняння ефективності ЛІЕД при варіюванні кількості паралельних виток

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

Варіювання опором і МПЗ проведене щодо їхніх базових значень з використанням безрозмірних коефіцієнтів

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

а результати розрахунків дані на рис.8 і рис.9.

Висновки. Виконані дослідження показують, що запропонована методика розрахунку ударного робочого режиму ЛІЕД 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 ЛІЕД, як кількість паралельних віток обмоток, напруга заряду і ємність джерела електроживлення, опір обмоток і магнітні властивості системи ЛІЕД.

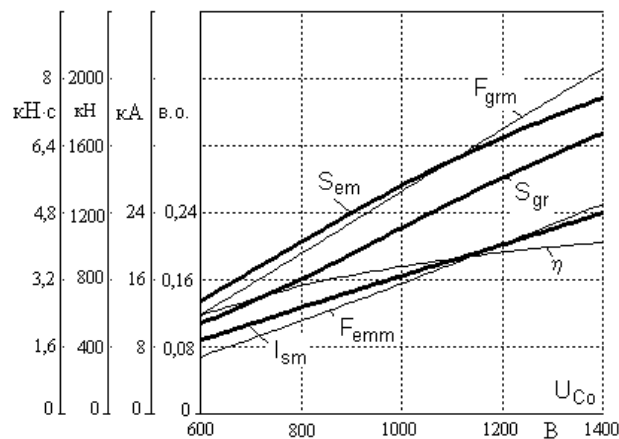


Рис. 6. Порівняння ефективності ЛІЕД при варіюванні напругою зарядки конденсатора

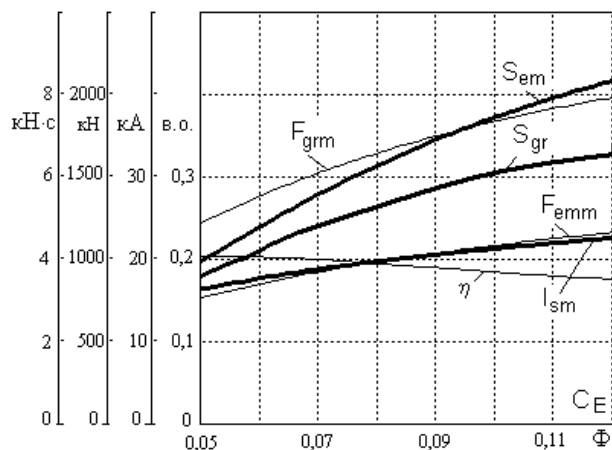


Рис. 7. Порівняння ефективності ЛІЕД при варіюванні ємністю конденсатора

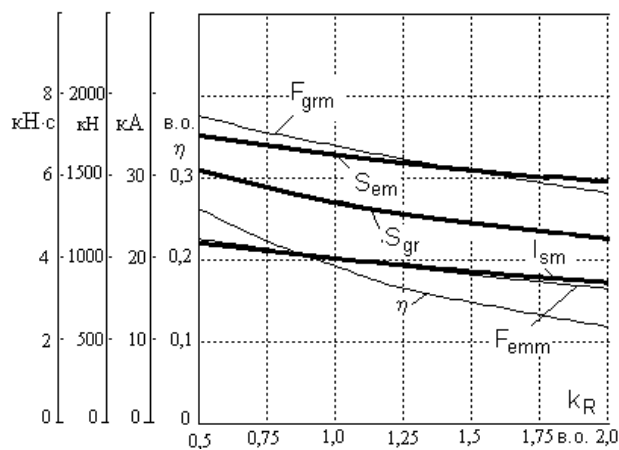


Рис. 8. Порівняння ефективності ЛІЕД при варіюванні опором обмоток

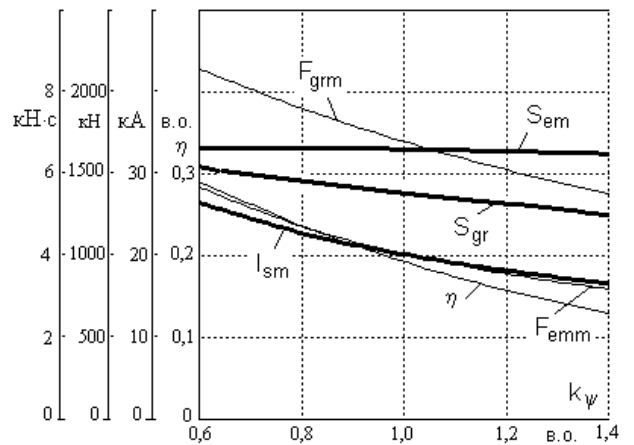


Рис. 9. Порівняння ефективності ЛІЕД при варіюванні МПЗ обмоток

ЛІТЕРАТУРА

1. Бару Ю.А. Линейные импульсные электродинамические двигатели для невзрывных источников сейсмических колебаний / Ю.А.Бару, А.К.Мельник, В.П.Ткаченко, С.В.Ткаченко, А.Ю.Фатенко, Н.А.Осташевский // 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 // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 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 // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №2. – С.43-47.
4. Невзрывные источники сейсмических колебаний. Справочник / Под ред. М.Б. Шнеерсона. – М.: Недра. – 1992.
5. Милых В.И. Математическая модель работы линейного импульсного электродвигателя для источника сейсмических колебаний / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Тематический выпуск «Проблемы автоматизованого электропривода. Теория і практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ». – Львів: ЕКОІнформ. – 2009. – С.282-284.
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 автоматизованого электропривода. Теория і практика». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – №28. – С.443-445.
7. Милых В.И. Математическое обеспечение численного анализа импульсного возбуждения линейного электродвигателя с двухпараметрической функцией магнитного потокоцепления / 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.
8. 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.
9. 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.