

АЛГОРИТМИЗИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ КАК УДАРНОГО ИСТОЧНИКА СЛАБЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Представлений лінійний імпульсний електродвигун, який слугує як джерело слабких сейсмічних коливань при пошуку корисних копалини. Сформульована його математична модель, що відповідає режиму ударного силового імпульсу. Розроблений алгоритм для чисельної реалізації цієї моделі і поданий приклад його розрахункового використання.

Представлен линейный импульсный электродвигатель, возбуждающий слабые сейсмоколебания при поиске полезных ископаемых. Сформулирована его математическая модель, соответствующая режиму ударного силового импульса. Разработан алгоритм для численной реализации этой модели и показан пример его расчетного использования.

Введение. Рассматриваемый линейный импульсный электродвигатель (ЛИЭД) [1-3] играет роль рабочего органа электромеханического сейсмоисточника, возбуждающего в земной коре слабые колебания при поиске нефти и газа [4]. Структурная схема управления и электропитания ЛИЭД представлена на рис. 1, его конструкция в упрощенной форме – на рис. 2.

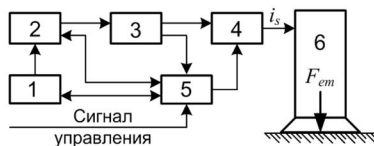


Рис. 1. Структурная схема электромеханического сейсмо-источника: 1 – источник электропитания;

2 – зарядное устройство; 3 – емкостной накопитель;

4 – тиристорный коммутатор; 5 – блок управления; 6 – ЛИЭД

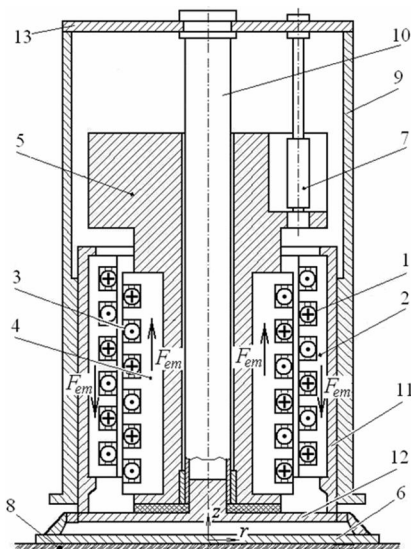


Рис. 2. Устройство ЛИЭД: 1, 3 – кольцевые обмотки якоря и реактора; 2, 4 – коаксиальные шихтованные сердечники якоря и реактора; 5 – внутренний каркас реактора, совмещенный с инерционной массой; 6 – опорный конус; 7 – амортизатор; 8 – грунт; 9 – корпус наружный; 10 – колонна направляющая; 11 – корпус якоря; 12 – плита с направляющим стаканом; 13 – верхний щит

Электрическая энергия поступает от источника питания – синхронного генератора, запасается в емкостном накопителе и в виде мощных импульсов тока i_s подается на обмотки ЛИЭД. В нем электрическая энергия преобразуется в механические импульсы си-

лы F_{em} , возбуждающие в грунте упругие колебания.

Реактор со своим каркасом и инерционной массой образуют механическую систему с массой m_r . Якорь, жестко связанный через свой корпус с плитой и опорным конусом, – вторая механическая система с массой m_a . Наружный корпус, верхний щит и направляющая колонна образуют еще одну стационарную механическую систему, относительно которой якорь и реактор могут перемещаться: первый, скользя по внутренней поверхности наружного корпуса со скоростью v_r , второй – по направляющей колонне со скоростью v_a .

Ударные импульсы силы F_{em} заданного направления порождают взаимодействующие якорь и реактор [3], благодаря чередующимся направлениям тока в их обмотках (рис. 2). Под действием импульса силы реактор отскакивает вверх, а рабочее воздействие вниз на грунт оказывает силовая "отдача" якоря.

Отскок реактора демпфирует гидравлический амортизатор, но только после рабочего хода реактора с целью безударного возврата реактора в исходное положение. Рабочий ход реактора составляет примерно половину полюсного деления (полюсное деление τ_p – шаг между осями соседних зубцов якоря или реактора). Якорь перемещается на значительно меньшее расстояние, равное упругой деформации грунта.

Главными функциональными параметрами ЛИЭД импульсного действия считаются амплитуда механической силы F_{emm} , длительность импульса t_{iem} этой силы, а также интегральный по времени t импульс силы [1, 2, 5]

$$S_{em} = \int_0^{t_{iem}} F_{em}(t) \cdot dt. \quad (1)$$

Аналитический расчет этих и других параметров по [1] для рассматриваемого ЛИЭД сопряжен со значительными допущениями, но необходим для исходного выбора размеров конструкции. Для более реалистичной оценки ЛИЭД и его последующего совершенствования задача должна решаться с одновременным учетом электромагнитных, механических и тепловых динамических процессов, часть из которых связана с нелинейно изменяющимися параметрами.

Постановка задач исследования. Целью данной работы является представление математической модели, характеризующей рабочий импульсный режим рассматриваемого ЛИЭД с учетом совокупности электромагнитных, механических и тепловых процессов, и ее преобразование в алгоритм, который только и позволяет производить анализ этого режима с воз-

возможностью варьирования комплексом необходимых параметров при учете их нелинейных взаимосвязей.

Математическая модель ЛИЭД.

Емкостной накопитель энергии, обмотки, ферромагнитные сердечники и массы реактора и якоря – взаимосвязанная электромагнитно-механическая система ЛИЭД, схема которой представлена на рис. 3, а на рис. 4 отдельно вынесена его электрическая схема замещения.

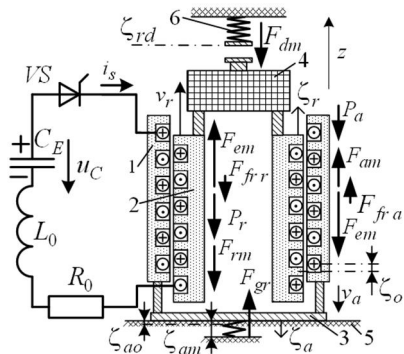


Рис. 3. Электромагнитно-силовая схема ЛИЭД: 1 – активная часть якоря; 2 – активная часть реактора; 3 – механическая часть якоря, воздействующая на грунт; 4 – инерционная масса реактора; 5 – грунт; 6 – демпфер

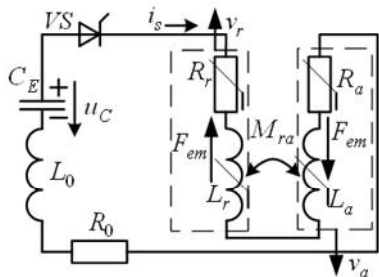


Рис. 4. Электрическая схема замещения ЛИЭД

Рабочий режим ЛИЭД в соответствии с его электросиловой схемой (рис. 3 и рис. 4) описывается системой электромагнитно-механических уравнений [6]:

$$\frac{d\Psi}{dt} + (R_r + R_a + R_0) \cdot i_s + L_0 \frac{di_s}{dt} + \frac{1}{C_E} \int i_s dt = U_{Co}; \quad (2)$$

$$F_{em} = P_r + F_{mr} + F_{fr_r} + F_{dm}; \quad (3)$$

$$F_{em} = F_{ma} + F_{gr} - P_a + F_{fr_a}, \quad (4)$$

где $\Psi(\zeta, i_s)$ – результирующее магнитное потокоцепление (МПС) электрической цепи, складывающееся из собственных и взаимных магнитных потокоцеплений обмоток реактора и якоря; $F_{em}(\zeta, i_s)$ – сила взаимодействия реактора и якоря, также как и МПС, двухпараметрическая функция тока i_s и взаимного аксиального смещения реактора и якоря ζ ; $R_r(\theta_r)$ 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; $F_{gr}(\zeta_a)$, $F_{dm}(\zeta_r)$ – сила упругой реакции грунта под опорной плитой и демпфирующая сила амортизатора, являющиеся функциями индивидуальных аксиальных смещений якоря ζ_a и реактора ζ_r , соответственно; $F_{fr_r} = k_{fr_r} \cdot v_r$; $F_{fr_a} = k_{fr_a} \cdot v_a$ – силы динамического трения реактора и якоря об их направ-

ляющие (по сравнению с предыдущими силами оказались весьма малы); k_{fr_r} , k_{fr_a} – коэффициенты этого трения. На реактор и якорь действуют также силы инерции $F_{mr} = m_r a_r$, $F_{ma} = m_a a_a$ и их весовые силы $P_r = m_r g_{gr}$, $P_a = m_a g_{gr}$, где a_r , a_a – ускорение движения реактора и якоря; g_{gr} – гравитационная постоянная.

С учетом того, что МПС $\Psi(\zeta, i_s)$ зависит от временных функций взаимного аксиального смещения $\zeta(t)$ реактора и якоря и тока $i_s(t)$ в их последовательной цепи, в (1) производная преобразуется к виду $\frac{d\Psi}{dt} = \frac{\partial\Psi}{\partial\zeta} \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial\Psi}{\partial i_s} \frac{di_s}{dt} = e_v + e_L$, где $e_v = \frac{\partial\Psi}{\partial\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dt}$ – ЭДС движения, которая определяется с учетом скорости $v_{ra} = \frac{d\zeta}{dt}$ относительного перемещения реактора и

якоря; $e_L = L_{dif} \cdot \frac{di_s}{dt}$ – ЭДС самоиндукции, где выделена $L_{dif} = \frac{\partial\Psi}{\partial i_s}$ – дифференциальная индуктивность

последовательно соединенных обмоток реактора и якоря, также зависящая от ζ и i_s .

Кроме того, в (2) выделяется

$$u_C = U_{Co} - \frac{1}{C_E} \int i_s dt - \text{напряжение на зажимах конденсатора, а также } u_R = i_s(R_r + R_a + R_0) - \text{падение напряжения на сопротивлениях.}$$

При решении системы уравнений (2)–(4) наиболее трудоемким оказалось оперирование с функциями $\Psi(\zeta, i_s)$ и $F_{em}(\zeta, i_s)$. Их пришлось заранее подготовить численно-полевыми расчетами [3, 7] с учетом насыщения сердечников при достаточно большом сочетании ζ и i_s (21×30).

Частично зависимости $\Psi(\zeta, i_s)$ даны на рис. 5, где $F_n = i_s N_n / a_p$ – МДС на один паз и якоря, и реактора; N_n , a_p – числа витков в пазу и параллельных ветвей обмоток; Ψ_w – МПС при одном витке на паз, тогда $\Psi = \Psi_w N_n / a_p$. Значение $\zeta = 0$ соответствует положению "нейтрали", когда пазы находятся против зубцов, как на рис. 2 (для ориентировки – $\tau_p = 84$ мм).

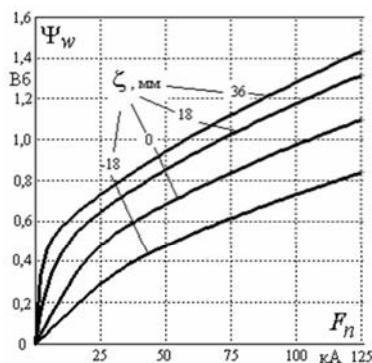


Рис. 5. Зависимости $\Psi_w(F_n)$ при указанных значениях ζ

Принцип оперирования с производными МПС представлен в [8]. При итерационном расчете переходного процесса их значения при конкретных текущих значениях ζ и i_s определялись на основе локальных аппроксимаций табличной функции $\Psi(\zeta, i_s)$ кубическими полиномами отдельно по каждому из аргументов при фиксировании другого аргумента.

Основным движителем является упоминавшаяся сила $F_{em}(\zeta, i_s)$. Эта двухпараметрической функция готовилась аналогично МПС численно-полевыми расчетами [3] при таком же количестве соотношений ζ и i_s . Частично зависимости $F_{em}(\zeta, i_s)$ показаны на рис. 6, а при итерационном расчете переходного процесса для текущих значений ζ и i_s сила F_{em} определялась, как и МПС в [8], локальными аппроксимациями табличной функции $F_{em}(\zeta, i_s)$ кубическими полиномами.

К важнейшим силам относится сила реакции упругого грунта F_{gr} . Ее целиком адекватное определение в процессе расчета является практически невыполнимой задачей, так как F_{gr} в условиях эксплуатации зависит от целого ряда слабо прогнозируемых факторов. Поэтому для обеспечения расчетов ЛИЭД была принята гипотетическая зависимость силы $F_{gr}(\zeta_a)$ от осевого смещения якоря. В исходном положении $\zeta_a = 0$ (рис. 3), а при ударном режиме работы имеет место максимальная деформация грунта на ζ_{am} (по экспериментальным данным – около 10-15 мм). При этом F_{gr} достигает максимального значения F_{grm} , которое задается на основе тестовых расчетов ЛИЭД и соответствует максимально возможной силе F_{em} .

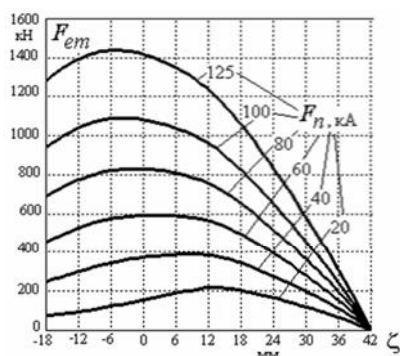


Рис. 6. Зависимости $F_{em}(\zeta)$ при указанных значениях I_n

Для прямого хода якоря с углублением опорной плиты в грунт была принята линейная зависимость $F_{gr} = k_{res1}\zeta_a$ (линия 1 на рис. 7), где коэффициент упругости грунта $k_{res1} = F_{grm}/\zeta_{am}$. После ослабления силы F_{em} упругая сила F_{gr} отбрасывает якорь в исходное положение и на обратном ходе (линия 2 на рис. 7) принята параболическая функция $F_{gr} = k_{res2}(\zeta_a - \zeta_{ao})^2$ с частично необратимой деформацией грунта ζ_{ao} , где коэффициент упругости грунта $k_{res2} = F_{grm} / (\zeta_{am} - \zeta_{ao})^2$.

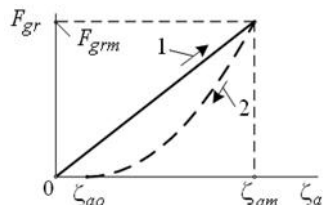


Рис. 7. Функция упругой реакции грунта

Амортизатор реактора действует уже после завершения ударного импульса ЛИЭД при его смещении до уровня контакта ζ_{rd} (рис. 3). При гашении скорости и возврате реактора в исходное положение возможны различные функции демпфирующей силы F_{dm} в зависимости от принципа действия амортизатора. На данном этапе приняли функцию $F_{dm} = F_{dmst} + F_{dmdin}$ с составляющими статической $F_{dmst} = k_{dmst}P_r$ и динамиче-

ской $F_{dmdin} = k_{dmv}v_r$, где $k_{dmv} = k_{Fm}F_{em}/v_{rd}$ – коэффициент демпфирования; k_{dmst} , k_{Fm} – коэффициенты, определяющие эти силы в долях от веса реактора P_r и максимальной силы ЛИЭД F_{em} ; v_{rd} – скорость реактора при вступлении в контакт с амортизатором. Причем сила F_{dm} всегда направлена против движения: ее знак противоположен знаку скорости v_r . В рабочем интервале $F_{dm} = 0$, т.е. действие амортизатора не учитывается.

Ориентируясь на численно-итерационное решение, из дифференциального уравнения (2) выделили производную тока i_s по времени t :

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{u_C - u_R - e_v}{L_{dif} + L_o} \quad (5)$$

Из (3) и (4), с учетом выражений F_{mr} , F_{ma} , P_r и P_a , получаем ускорения движения реактора и якоря:

$$a_r = (F_{em} - F_{fr} - F_{dm})/m_r - g_{gr}; \quad (6)$$

$$a_a = (F_{em} - F_{gr} - F_{fa})/m_a + g_{gr}. \quad (7)$$

При достижении условия $a_r > 0$ с момента времени t_r начинается движение реактора, при $a_a > 0$ с момента времени t_a движется якорь. Их скорости

$$v_r = \int_{t_r}^t a_r dt; \quad v_a = \int_{t_a}^t a_a dt. \quad (8)$$

И начинаются их собственные смещения в указанных на рис. 3 направлениях:

$$\zeta_r = \int_{t_r}^t v_r dt; \quad \zeta_a = \int_{t_a}^t v_a dt, \quad (9)$$

что и дает рассматривавшееся выше взаимное смещение $\zeta = \zeta_r + \zeta_a + \zeta_o$, хотя, вообще, движение реактора и якоря возможно только при их нахождении в зонах $\zeta_r > 0$ и $\zeta_a > 0$, соответственно.

Начальное смещение реактора ζ_o из положения "нейтрали" в сторону, противоположную его движению, находилось из условия наиболее эффективной работы ЛИЭД и составило $\zeta_o = -12$ мм.

Кроме описанных электромагнитных и механических процессов при расчете учитывается тепловой процесс, который приводит к увеличению температуры обмоток и кабелей и соответствующему изменению их сопротивлений. Быстротекущий процесс одного импульса считается адиабатическим и его расчет проводится по аналогии с [9] на основе комплекта исходных данных: m_{cr} , m_{ca} , m_{cc} – массы меди реактора, якоря и кабеля; T_{ro} , T_{ao} , T_{co} , R_{ro} , R_{ao} , R_{co} – исходные температуры обмоток якоря и реактора, кабеля и их сопротивления при этих температурах; k_{pc} , c_{pc} – температурный коэффициент сопротивления меди и ее удельная теплоемкость.

Тепловая энергия, выделившаяся в течение интервала времени dt в обмотках реактора, якоря и в кабеле, соответствующие приращения температуры и их температуры T_r , T_a , T_c определяются по известным формулам [9], которые представляются далее непосредственно в алгоритме, реализующем математическую модель.

Как отмечалось, оценка эффективности работы ЛИЭД обычно проводится по вырабатываемому импульсу силы (1). Но, благодаря разработанной алгоритмизированной математической модели, нами введена еще и более объективная оценка по импульсу силы, воздействующей непосредственно на грунт

$$S_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} dt, \quad (10)$$

где t_{img+} – время действия силы F_{gr} до того момента, пока якорь еще движется в грунт (т.е. на рис. 3 пока еще $v_a > 0$).

Еще используется условный КПД ЛИЭД $\eta = W_{gr} / W_{el}$, где $W_{el} = 0,5 \cdot C_E (U_{Co}^2 - U_{Crel}^2)$ – отданная конденсатором электрическая энергия (U_{Crel} – остаточное напряжение); $W_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} v_a dt$ – механическая энергия деформации грунта.

В условиях сложной совокупности представленных уравнений и формул, дополненных необходимым комплектом начальных условий, переходный процесс рассчитывался в численной форме с использованием метода Рунге-Кутты 4 порядка для нахождения производной (5). И здесь основная проблема заключается в предварительном или пошаговом определении величин, входящих в эти уравнения.

Алгоритм расчета ударного режима работы ЛИЭД. Математическая модель даже представленного высокого уровня не может принести числовых результатов без эффективного алгоритма, ориентированного на программную реализацию с последующими расчетами на ЭВМ. Поэтому представим достаточно детально алгоритм расчета импульсного рабочего режима ЛИЭД, а, по сути – **алгоритмизированную математическую модель.**

1. $k = 0$ – старт счетчика шагов интегрирования.

2. Инициализация начальных значений параметров в соответствии с установленными обозначениями:

$t = 0$; $i_s = 0$; $\zeta_a = 0$; $\zeta_r = 0$; $\zeta = \zeta_0$; $u_C = U_{Co}$; $u_R = 0$; $T_r = T_{ro}$; $T_a = T_{ao}$; $T_c = T_{co}$; $R_r = R_{ro}$; $R_a = R_{ao}$; $R_c = R_{co}$; $R_s = R_r + R_a + R_c$; $v_a = 0$; $v_r = 0$; $v_{ra} = 0$; $e_v = 0$; $F_{gr} = 0$; $F_{dm} = 0$; $k_{dmst} = 0,8$; $k_{frm} = 0,02$; $F_{frr} = 0$; $F_{fra} = 0$; $k_{fra} = k_{frr} = 100$ Н·с/м; $S_{em} = 0$; $S_{gr} = 0$; $W_{gr} = 0$.

3. При начальных значениях ζ и i_s посредством специальной процедуры определяются производная функции МПС по ζ , т.е. $p_\zeta = \frac{\partial \Psi}{\partial \zeta}(i_s, \zeta)$ и дифференциальная индуктивность $L_{dif} = \frac{\partial \Psi}{\partial i_s}(i_s, \zeta)$.

4. Эквивалентная индуктивность $L_s = L_0 + L_{dif}$ и условная постоянная времени $\tau = L_s / R_s$ на начало возбуждения ЛИЭД.

5. Временной шаг интегрирования $dt = k_\tau \cdot \tau$, где k_τ – коэффициент, задающий долю временного шага от τ (установлено, что достаточным с запасом является $k_\tau = 3 \cdot 10^{-4}$).

6. Начало итерационного процесса: $k = k+1$ – номер шага интегрирования, а далее индекс $k-1$ указывает на значение на предыдущем шаге (первый раз – начальное значение), индекс k – вновь найденное значение на текущем шаге.

7. В соответствии с методом Рунге-Кутты IV порядка производная тока i_s' находится на интервале dt_k четыре раза на основе выражения (5)

$$i_{s,n}' = (u_{C,n} - i_{s,n} \cdot R_{s,k-1} - e_{v,k-1}) / (L_0 + L_{dif,k-1}) \quad (11)$$

с использованием частных шагов, где используются

промежуточные значения тока

$$i_{s,n+1} = i_{s,n} + i_{s,n}' \cdot dt_n \quad (12)$$

и напряжения конденсатора

$$u_{C,n+1} = u_{C,k-1} - \frac{i_{s,k-1} + i_{s,n+1}}{2 \cdot C_E} dt_n, \quad (13)$$

где n – номер внутреннего шага в пределах интервала dt_k .

7.1. Первый раз при $n = 1$ принимаются $i_{s,1} = i_{s,k-1}$, $u_{C,1} = u_{C,k-1}$ и в начале интервала при t_{k-1} определяется производная $i_{s,1}'$ (11), используя которую при частичном шаге $dt_1 = 0,5 \cdot dt_k$ определяются в середине интервала ток $i_{s,2}$ (12) и напряжение $u_{C,2}$ (13).

7.2. Второй раз при $n = 2$, используя найденные значения $i_{s,2}$ и $u_{C,2}$, определяется $i_{s,2}'$ (11) в середине интервала и с этим значением, приняв $dt_2 = 0,5 \cdot dt_k$, вновь идем до середины интервала, где определяем $i_{s,3}$ (12) и $u_{C,3}$ (13).

7.3. Третий раз при $n = 3$ по найденным значениям $i_{s,3}$ и $u_{C,3}$ определяется $i_{s,3}'$ (11) в середине интервала и с этим значением, приняв $dt_3 = dt_k$, идем уже до конца интервала, где определяем $i_{s,4}$ (12) и $u_{C,4}$ (13).

7.4. Четвертый раз при $n = 4$ через найденные значения $i_{s,4}$ и $u_{C,4}$ определяется $i_{s,4}'$ (11) в конце интервала.

В итоге и определяется на временном шаге dt_k производная $i_{s,k}' = \frac{1}{6} (i_{s,1}' + 2 \cdot i_{s,2}' + 2 \cdot i_{s,3}' + i_{s,4}')$.

8. Время от начала переходного процесса

$$t_k = t_{k-1} + dt_k.$$

9. Ток в последовательной цепи ЛИЭД

$$i_{s,k} = i_{s,k-1} + i_{s,k}' \cdot dt_k.$$

10. Напряжение конденсатора

$$u_{C,k} = u_{C,k-1} - \frac{i_{s,k-1} + i_{s,k}}{2 \cdot C_E} dt_k.$$

11. Эффективное значение тока в квадрате $i_{sef,k}^2 = \frac{1}{3} (i_k^2 + i_k i_{k+1} + i_{k+1}^2)$ при линейном изменении на интервале dt_k .

12. Тепловая энергия, выделявшаяся за интервал в проводниках обмоток реактора, якоря и кабеля $dQ_{r,k} = R_{r,k-1} \cdot i_{sef,k}^2 \cdot dt_k$; $dQ_{a,k} = R_{a,k-1} \cdot i_{sef,k}^2 \cdot dt_k$; $dQ_{c,k} = R_{c,k-1} \cdot i_{sef,k}^2 \cdot dt_k$.

13. Приращение температуры в них $dT_{r,k} = \frac{dQ_{r,k}}{c_{pc} m_{cr}}$; $dT_{a,k} = \frac{dQ_{a,k}}{c_{pc} m_{ca}}$; $dT_{c,k} = \frac{dQ_{c,k}}{c_{pc} m_{cc}}$.

14. Новые температуры обмоток реактора, якоря и кабеля на конец интервала: $T_{r,k} = T_{r,k-1} + dT_{r,k}$; $T_{a,k} = T_{a,k-1} + dT_{a,k}$; $T_{c,k} = T_{c,k-1} + dT_{c,k}$.

15. Коэффициенты повышения температур провода обмоток реактора, якоря и кабеля по сравнению с исходными температурами: $k_{Tr} = 1 + k_{pc} (T_{r,k} - T_{ro})$; $k_{Ta} = 1 + k_{pc} (T_{a,k} - T_{ao})$; $k_{Tc} = 1 + k_{pc} (T_{c,k} - T_{co})$.

16. Сопротивления обмоток реактора, якоря и кабеля на конец интервала и их сумма: $R_{r,k} = R_{ro} \cdot k_{Tr}$; $R_{a,k} = R_{ao} \cdot k_{Ta}$; $R_{c,k} = R_{co} \cdot k_{Tc}$; $R_{s,k} = R_{r,k} + R_{a,k} + R_{c,k}$.

17. Электромагнитная сила взаимодействия якоря и реактора $F_{em,k}$ при имеющихся значениях ζ_{k-1} и $i_{s,k}$ определяется соответствующей процедурой интерполяции имеющейся табличной функции $F_{em}(\zeta, i_s)$.

18. Ускорение реактора

$$a_{r,k} = (F_{em,k} - F_{dm,k-1} - F_{fr,r,k-1}) / m_r - g_{gr}$$

19. В исходном положении при $\zeta_r = 0$ реактор зафиксирован и ниже опуститься не может. Поэтому движение реактора возможно при $\zeta_{r,k} > 0$ или при $a_{r,k} > 0$. Только при выполнении хотя бы одного из этих условий реактор движется со скоростью $v_{r,k} = v_{r,k-1} + a_{r,k} \cdot dt_k$ и изменяет свое положение, т.е. $\zeta_{r,k} = \zeta_{r,k-1} + v_{r,k} \cdot dt_k$, иначе $v_{r,k} = 0$ и изменения ζ_r не происходит.

20. В начале процесса демпфирующая сила амортизатора реактора $F_{dm,k} = 0$. Тормозящая сила появляется при $\zeta_{r,k} > \zeta_{rd}$, причем если $v_{r,k} > 0$, то $F_{dm,k} = k_{dmst} \cdot P_r + k_{dmv} \cdot v_{r,k}$, если нет, то ее знак изменяется $F_{dm,k} = -k_{dmst} \cdot P_r + k_{dmv} \cdot v_{r,k}$, т.е. и при обратном движении эта сила замедляет движение. При достижении $\zeta_{r,k} = 0$ реактор фиксируется.

21. Ускорение якоря

$$a_{a,k} = (F_{em,k} - F_{gr,k-1} - F_{fra,a,k-1}) / m_a + g_{gr}$$

22. Выше исходного положения $\zeta_a = 0$ якорь подняться не может из-за наличия ограничителя. Поэтому при обратном движении, когда $v_a < 0$, и достижении $\zeta_{r,a} = 0$ якорь принудительно останавливается и далее $v_a = 0$. В противном случае определяются скорость движения и перемещение якоря

$$v_{a,k} = v_{a,k-1} + a_{a,k} \cdot dt_k; \zeta_{a,k} = \zeta_{a,k-1} + v_{a,k} \cdot dt_k$$

23. При движении якоря вниз, т.е. при $v_{a,k} > 0$, сила упругой реакции грунта $F_{gr,k} = k_{res1} \zeta_{a,k}$, при смене знака v_a фиксируется достигнутые максимальные значения силы F_{grm} и углубления в грунт ζ_{am} , через которые определяется коэффициент упругости грунта $k_{res2} = F_{grm} / (\zeta_{am} - \zeta_{ao})^2$ и уровень остаточной деформации $\zeta_{ao} = 0,2 \cdot \zeta_{am}$. Далее при обратном движении, т.е. при $v_{a,k} < 0$, сила определяется по новой формуле $F_{gr,k} = k_{res2} (\zeta_{a,k} - \zeta_{ao})^2$, но по достижении $\zeta_{a,k}$ уровня ζ_{ao} принимается $F_{gr} = 0$.

24. Скорость относительного движения якоря и реактора и их взаимное смещение

$$v_{ra,k} = v_{r,k} + v_{a,k}; \zeta_k = \zeta_{r,k} + \zeta_{a,k} + \zeta_o$$

25. Производная функции МПС по взаимному смещению реактора и якоря $p_{\zeta,k} = \frac{\partial \Psi}{\partial \zeta} (i_k, \zeta_k)$ и ЭДС движения $e_{v,k} = p_{\zeta,k} \cdot v_{ra,k}$.

26. Производная функции МПС по i_s – дифференциальная индуктивность $L_{dif,k} = \frac{\partial \Psi}{\partial i_s} (i_k, \zeta_k)$.

27. Силы динамического трения реактора и якоря

$$F_{fra,k} = k_{fra} \cdot v_{r,k}; F_{fra,k} = k_{fra} \cdot v_{a,k}$$

28. Импульс силы, развиваемой ЛИЭД (1), а также импульс силового воздействия на грунт (10):

$$S_{em,k} = S_{em,k-1} + 0,5 \cdot (F_{gr,k-1} + F_{gr,k}) \cdot dt_k;$$

$$S_{gr,k} = S_{gr,k-1} + 0,5 \cdot (F_{gr,k-1} + F_{gr,k}) \cdot dt_k,$$

причем для S_{gr} суммирование продолжается только

при вдавливания якоря в грунт, т.е. пока $v_{a,k} > 0$.

Энергия деформации грунта

$$W_{gr,k} = W_{gr,k-1} + (F_{gr,k-1} + F_{gr,k}) (v_{a,k} + v_{a,k}) \cdot dt_k / 4.$$

29. По каким-либо критериям проверяется, не пора ли прекратить итерационный процесс. Если достаточно расчета только рабочего импульса, то расчет прекращается при остановке якоря ($\zeta_a = 0$), если интересуется и процесс торможения реактора, то при $v_r = 0$.

30. Если расчет не завершен, то происходит возврат на пункт б и итерационный процесс продолжается при новых значениях тока $i_{s,k}$, смещений $\zeta_{a,k}$, $\zeta_{r,k}$, ζ_k , температур θ_k и других величин.

Тестовый расчет и его результаты.

Для общего представления о расчетном варианте ЛИЭД (рис. 2) 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. Общая высота ЛИЭД около 2,6 м.

Графики функций, характеризующих протекание переходного процесса в рабочем интервале, даны на рис. 8-9. В этом интервале графики ζ_a и v_a показывают, что якорь осуществил свое ударное действие и вернулся в исходное состояние. На рис. 10 показаны графики некоторых из этих же величин в значительно большем интервале с включением процесса торможения реактора и начала его возврата.

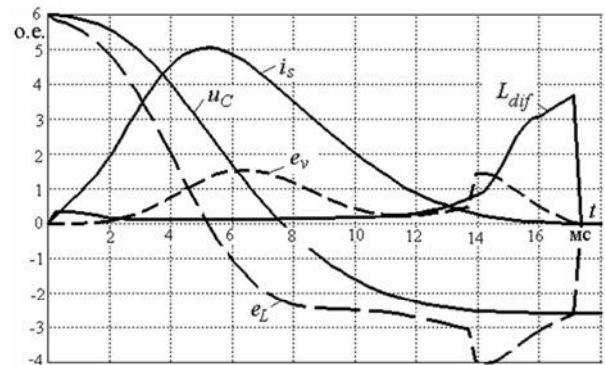


Рис. 8. Временные функции электрических величин

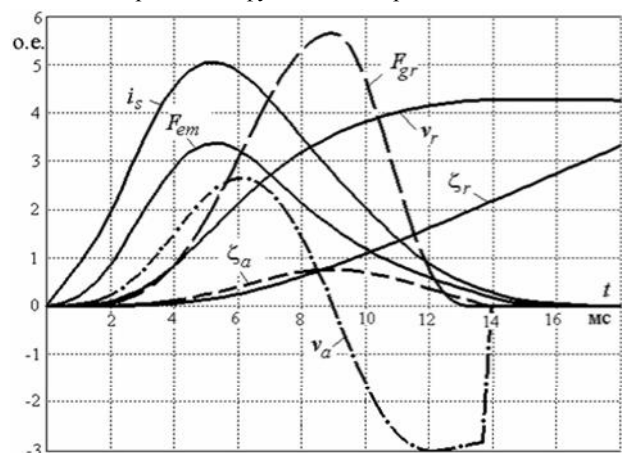


Рис. 9. Временные функции механических величин

Функции даны в относительных единицах (о.е.), но для числовой оценки дадим их максимальные значения: ток $i_s - I_{smax} = 20,1$ кА, сила $F_{em} - F_{emm} = 1008$ кН, сила $F_{gr} - F_{grm} = 1690$ кН, скорости реактора $v_r - v_{rm} = 4,28$ м/с и якоря $v_a - v_{am} = 2,64$ м/с; сдвиг якоря

$\zeta_a - \zeta_{am} = 11,3$ мм; сдвиг реактора $\zeta_r - \zeta_{rm} = 401$ мм; $L_{dif} - L_{difm} = 3,41$ мГн; $u_C - U_{Co} = 1200$ В; $e_v - e_{vmax} = 306$ В; $e_L - e_{Lmax} = 1200$ В, временной шаг интегрирования оставался постоянным и составлял $dt = 0,008$ мс. Весь расчет на ЭВМ длится порядка 1 с.

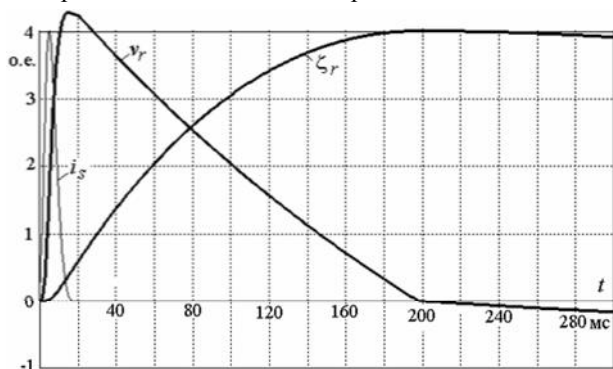


Рис. 10. Временные функции с участком торможения реактора и началом обратного движения

Кроме того, получено $S_{em} = 6654$ Н·с; $S_{gr} = 5513$ Н·с; $\eta = 0,194$, а также длительности импульсов для тока $i_s - t_{imi} = 14,4$ мс; для силы $F_{em} - t_{ime} = 13,2$ мс; для силы $F_{gr} - t_{img} = 9,6$ мс. Принцип определения длительности поясняется на рис. 11 на примере временной функции тока. Точки, соответствующие 0,1 и 0,9 от максимального значения I_{smax} , соединяются на переднем и заднем фронтах. Пересечение полученных отрезков a_1a_2 и b_1b_2 с осью времени и дает длительность импульса.

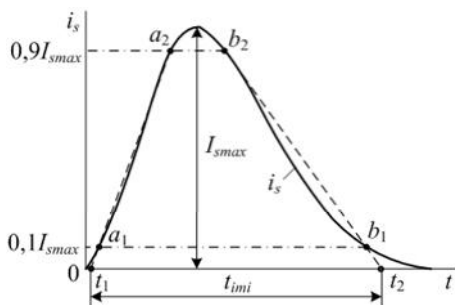


Рис. 11. Принцип определения длительности импульса

За один рабочий режим нагрев обмоток оказывается менее 1 градуса, несмотря на значительный максимум плотности тока – порядка 125 А/мм². Однако при многократном повторении импульсов с периодом $T_{imp} = 6$ с это приводит к значительно большему нагреву, соответствующим допустимым пределам избранного класса изоляции.

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.

Выводы.

Представленные математическая модель и алгоритм позволяют эффективно исследовать динамический импульсный режим работы линейного электродвигателя, предназначенного для возбуждения в земной коре слабых сейсмических колебаний. Их особенностью является совокупность взаимосвязанных электромагнитных, механических и тепловых величин, в том числе имеется двухпараметрические нелинейные функции

магнитного потокоцепления и движущей силы.

Алгоритм позволяет варьировать значительным набором входных параметров разной природы, а также получать большой ряд выходных временных функций и интегральных параметров ЛИЭД, показывающих его процесс работы и ее эффективность не только непосредственно как двигателя, но и как источника ударного воздействия на грунт.

Все это дает возможность в достаточно полной мере проводить исследование рабочего импульсного режима ЛИЭД и является основанием для проведения всестороннего расчетного анализа этого режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко В.П., Ткаченко С.В., Фатенко А.Ю., Осташевский Н.А. Линейные импульсные электродинамические двигатели для невзрывных источников сейсмических колебаний // Вестник НТУ "ХПИ". Электроэнергетика и преобразовательная техника. – 2006. – № 38. – С. 83-92.
2. Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко С.В., Милых В.И. Выбор типа и основных параметров линейного импульсного электродвигателя для невзрывных сейсмоисточников // Электротехника і електромеханіка. – 2008. – № 3. – С. 41-44.
3. Милых В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // Электротехніка і електромеханіка. – 2008. – №6. – С. 36-39.
4. Невзрывные источники сейсмических колебаний. Справочник / Под ред. М.Б. Шнеерсона. – М.: Недра, 1992.
5. 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.
6. Милых В.И., Ткаченко С.В. Математическая модель работы линейного импульсного электродвигателя для источника сейсмических колебаний // Темат. вип. наук.-техн. журналу "Електроінформ". – Львів: ЕКОінформ. – 2009. – С.282-284.
7. Милых В.И., Ткаченко С.В. Анализ магнитного поля в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // Электротехніка і електромеханіка. – 2009. – №2. – С. 43-47.
8. Милых В.И., Ткаченко С.В. Математическое обеспечение численного анализа импульсного возбуждения линейного электродвигателя с двухпараметрической функцией магнитного потокоцепления // Вісник Кременч. держ. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2010. – Вип. 3/2010(62). Част. 2. – С. 70-73.
9. Милых В.И. Исследование импульсного режима возбуждения линейного электродвигателя // Электротехніка. – 1994. – № 10. – С. 3-9.

Поступила 06.12.2010

Милых Владимир Иванович, д.т.н., проф.
Ткаченко Сергей Валериевич
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электрические машины"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 707-65-14; e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

V.I. Milykh, S.V. Tkachenko

The algorithmic mathematical model of a linear impulsive electric motor as a shock source of small seismic oscillations.
A linear impulsive electric motor, creating small seismic oscillations for a search of minerals, is presented. His mathematical model, which corresponds to the shock power impulse mode, is formulated. The algorithm is developed for numeral realization of this model and the example of his calculation use is shown.
Key words – linear impulsive electric motor, mathematical model, algorithm, calculation.