

АНАЛИЗ УДАРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Введение. Линейный импульсный электродвигатель (ЛИЭД) для источника сейсмических колебаний в земной коре, что используется при поиске полезных ископаемых, уже представлялся в [1-4].

Ударный рабочий режим ЛИЭД поясним с помощью его электросиловой схемы, представленной на рис.1.

Основными элементами двигателя являются якорь и реактор. Их активные части 1 и 2 состоят из коаксиальных цилиндрических шихтованных ферромагнитных сердечников и секционированных обмоток, расположенных в пазах. Обмотки соединены последовательно и питаются током i_s от емкостного накопителя энергии C_E .

Чередующееся направление тока в обмотках обеспечивает заданное направление сил электродинамического и электромагнитного происхождения F_{em} [1]. Якорь перемещается со скоростью v_a вниз и через опорную плиту 3 воздействует на грунт 5 импульсом силы. Реактор, усиленный инерционной массой 4, отскакивает вверх со скоростью v_r . Этот отскок ограничивает и демпфирует амортизатор 6.

Постановка задач исследования. Математическая модель импульсного режима ЛИЭД, сопровождающего совокупностью электромагнитных, механических и тепловых процессов, в общем плане представлялась в [3]. Целью данной работы является конкретизация основных процессов в ЛИЭД и расчетная реализация этой математической модели с получением временных функций величин, характеризующих ударный режим его работы.

Материалы исследования. Реализуя поставленную задачу, сначала воспроизведем основные уравнения, составляющие математическую модель ЛИЭД, и наполним ее конкретным содержанием, что даст возможность получить в числовой форме параметры и характеристики ЛИЭД в ударном рабочем режиме.

Ориентируясь на численно-итерационное решение дифференциального уравнения (2) из [3], разрешим его сразу относительно производной тока i_s по времени t в едином контуре обмоток и источника:

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{u_C - u_R - e_v}{\frac{\partial \Psi}{\partial i_s} + L_o} \quad (1)$$

где $u_C = U_{C0} - \frac{1}{C_E} \int_0^t i_s dt$ – напряжение на зажимах конденсатора

(U_{C0} – его начальное значение); $u_R = i_s (R_r + R_a + R_o)$ – падение

напряжения на активных сопротивлениях обмоток реактора R_r , якоря R_a и подводных кабелей R_o , причем они зависят от соответствующих температур; $e_v = \frac{\partial \Psi}{\partial \zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dt}$ – ЭДС движения, которая определяется с

учетом скорости $v_{ra} = \frac{d\zeta}{dt}$ относительного перемещения ζ реактора и якоря; Ψ – суммарное магнитное потокоцепление (МПС) обмоток реактора и якоря; L_o – индуктивность подводных кабелей. Добавим, что если в

(1) объединить величины $\frac{di_s}{dt}$ и $\frac{\partial \Psi}{\partial i_s}$, то это даст не что иное, как ЭДС самоиндукции $e_L = \frac{\partial \Psi}{\partial i_s} \cdot \frac{di_s}{dt}$.

МПС, входящее в частные производные $\frac{\partial \Psi}{\partial i_s}$ и $\frac{\partial \Psi}{\partial \zeta}$ в выражениях e_L и e_v , является сложной функцией

$\Psi(\zeta, i_s)$ величин, подлежащих определению в процессе расчета рабочего режима ЛИЭД. Поэтому оперирование с МПС $\Psi(\zeta, i_s)$ и его производными является наиболее сложным компонентом расчета этого режима. Решение такой задачи представлено в [4] на основе предварительного многовариантного численно-полевого расчета Ψ при большом количестве соотношений ζ и i_s по методике, изложенной в [1, 2]. А при итерационном расчете переходного процесса значения производных при конкретных текущих значениях ζ и i_s определялись на основе локальных аппроксимаций табличной функции $\Psi(\zeta, i_s)$ кубическими полиномами отдельно по каж-

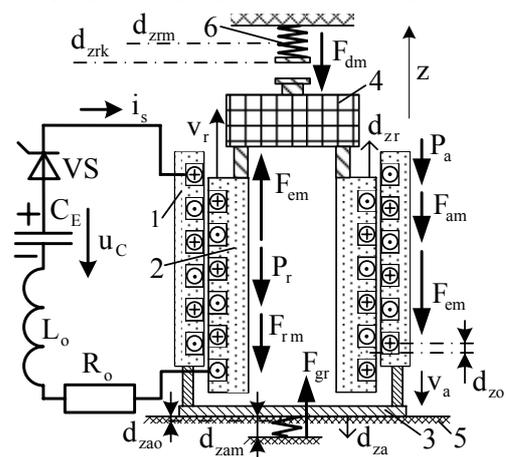


Рис. 1. Электросиловая схема ЛИЭД

дому из аргументов при фиксировании другого аргумента.

Теперь представим механическую часть математической модели ЛИЭД. Основной движущей силой является упоминавшаяся сила F_{em} , которая, также как и МПС, является двухпараметрической функцией $F_{em}(\zeta, i_s)$. Она готовилась аналогично МПС численно-полевыми расчетами [1] при большом количестве соотношений ζ и i_s . А при итерационном расчете переходного процесса для текущих значений ζ и i_s сила F_{em} определялись, как и МПС в [3], локальными аппроксимациями табличной функции $F_{em}(\zeta, i_s)$ кубическими полиномами.

На реактор и якорь действуют также силы инерции $F_{mr} = m_r a_r$ и $F_{ma} = m_a a_a$, и 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 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 расчетных условий ЛИЭД была принята гипотетическая зависимость силы $F_{gr}(d_{za})$ от осевого (по аксиальной оси z) смещения якоря d_{za} (рис. 2). В исходном положении $d_{za} = 0$, а при ударном режиме работы имеет место максимальная деформация грунта на d_{zam} (по экспериментальным данным – около 0,01 м). При этом F_{gr} достигает максимального значения F_{grm} , которое задается на основе тестовых расчетов ЛИЭД и соответствует максимально возможной силе F_{em} .

Тогда, если принять линейную зависимость $F_{gr}(d_{za})$ при прямом ходе якоря с углублением опорной плиты в грунт (линия 1 на рис. 2), имеем $F_{gr} = k_{res1} d_{za}$, где коэффициент упругости грунта, определенный по условно принятым величинам, а именно: $k_{res1} = F_{grm} / d_{zam}$.

После ослабления силы F_{em} сила упругости F_{gr} отбрасывает якорь в исходное положение. На обратном ходе (линия 2 на рис. 2), принимая частично необратимую деформацию грунта, предполагаем параболическую функцию $F_{gr}(d_{za})$ с ослаблением силы реакции и с ее действием до остаточного уровня смещения d_{zao} , т.е. $F_{gr} = k_{res2}(d_{za} - d_{zao})^2$, где коэффициент упругости грунта $k_{res2} = F_{grm} / (d_{zam} - d_{zao})^2$, удовлетворяющий гипотетической функции $F_{gr}(d_{za})$.

Амортизатор реактора вступает в действие только при смещении реактора d_{zr} до уровня контакта d_{zrk} (рис. 1), что происходит после завершения ударного импульса ЛИЭД. Поэтому действие амортизатора в рабочем режиме может не учитываться. На этапе гашения скорости реактора и его возврата в исходное положение могут быть использованы различные виды функции демпфирующей силы $F_{dm}(d_{zr})$ в зависимости от принципа действия амортизатора. На данном этапе примем простую функцию $F_{dm} = k_{dm}(d_{zr} - d_{zrk})$, где коэффициент демпфирования $k_{dm} = F_{dmm} / (d_{zrm} - d_{zrk})$ определяется с учетом максимума демпфирующей силы F_{dmm} при сжатии демпфера до уровня d_{zrm} . Причем сила F_{dm} всегда направлена против движения, т.е. имеет знак, противоположный знаку скорости v_r .

Кроме перечисленных сил на реактор и якорь могут действовать упоминавшиеся в [3] силы динамического трения F_{fr} , F_{fa} и силы аэродинамического сопротивления F_{adinr} , F_{adina} . Однако из дальнейших расчетов они исключаются, так как оказались на 2-4 порядка меньше остальных сил.

В итоге, для интервала времени, соответствующего рабочему ходу якоря и реактора, можно записать уравнения для их механических систем, учитывая принятые на рис. 1 положительные направления величин:

$$F_{em} = P_r + F_{mr}; F_{em} = F_{mr} + F_{gr} - P_r. \quad (2)$$

Отсюда, с учетом выражений для F_{mr} , F_{ma} , P_r и P_a , получаются ускорения движения реактора и якоря:

$$a_r = F_{em} / m_r - g_{gr}; a_a = (F_{em} - F_{gr}) / m_a + g_{gr}. \quad (3)$$

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

$$v_r = \int_{t_r}^t a_r dt; v_a = \int_{t_a}^t a_a dt. \quad (4)$$

И начинается их собственные смещения в указанных на рис. 1 направлениях:

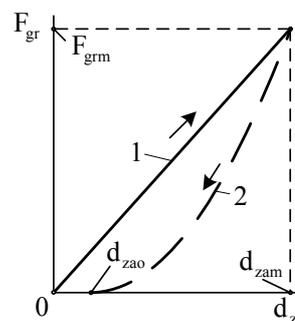


Рис. 2. Функция упругой реакции грунта

$$d_{zr} = \int_{t_r}^t v_r dt; \quad d_{za} = \int_{t_a}^t v_a dt, \quad (5)$$

что и дает рассматривавшееся выше взаимное смещение $\zeta = d_{zr} + d_{za} + d_{z0}$, хотя, вообще, движение реактора и якоря возможно только при их нахождении в зонах $d_{zr} > 0$ и $d_{za} > 0$, соответственно.

Величина d_{z0} – начальное смещение реактора из положения «нейтрали». В подготовительных расчетах МПС $\Psi(\zeta, i_s)$ [4] и силы $F_{em}(\zeta, i_s)$ [1] и, соответственно, в расчетах переходного процесса, принято, что $\zeta = 0$ соответствует такому взаимному положению реактора и якоря, когда середина нижнего паза сердечника реактора совпадает с серединой нижнего зубца сердечника якоря (остальные зубцы и пазы расположатся аналогично на каждом своем зубцовом делении) – это, так называемая, геометрическая нейтраль – такое положение ЛИЭД представлялось в [1-3]. Для увеличения эффективности работы ЛИЭД желательнее относительно небольшое начальное смещение реактора против движения, как показано на рис.1, где имеет место $d_{z0} < 0$.

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 [5].

В условиях сложной совокупности представленных уравнений и формул, дополненных необходимым комплектом начальных условий, переходный процесс рассчитывался в численной форме с использованием для нахождения производной (1) метода Рунге-Кутты 4 порядка. Пример рассчитанных временных функций ряда уже представленных величин дан на рис. 3 для ЛИЭД с параметрами, показанными в [1, 2, 4] (к ним добавим начальное напряжение заряда конденсатора 1200 В). Эти функции представлены в безразмерной форме, а для общей числовой оценки ударного рабочего режима ЛИЭД укажем максимумы некоторых из них: ток – 19,7 кА, сила F_{em} – 966 кН, скорости реактора и якоря – 3,83 и 2,92 м/с; ускорения реактора и якоря – 630 и 1320 м/с²; смещение якоря – 15,7 мм, а смещение реактора еще продолжается за пределами оси времени на рис. 3.

Из полного времени переходного процесса на локальном фрагменте рис. 3 выделен только активный участок, в пределах которого еще есть ток i_s и действует сила F_{em} . В этом интервале графики d_{za} и v_a показывают, что якорь осуществил свое ударное действие и вернулся в исходное состояние, когда $d_{za} \Rightarrow 0$.

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. Представленная совокупность соотношений электрических и механических величин, сопутствующих ударному режиму работы ЛИЭД, позволила наполнить его математическую модель конкретным содержанием. Это дает возможность в достаточно полной мере проводить расчеты рабочего импульсного режима ЛИЭД и является основанием для проведения всестороннего расчетного анализа этого режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Милых В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // *Электротехника і електромеханіка*.–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*.–2009.–№2.–С.43-47.
3. Милых В.И., Ткаченко С.В. Математическая модель работы линейного импульсного электродвигателя для источника сейсмических колебаний.- Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ»– Львів: ЕКОінформ, 2009 – С.282-284.
4. Милых В.И., Ткаченко С.В. Математическое обеспечение численного анализа импульсного возбуждения линейного электродвигателя с двухпараметрической функцией магнитного потокоцепления // *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*.– Кременчук: КДУ, 2010.- Вип.3/2010(62). Частина 2.–С.70-73.
5. Милых В.И. Исследование импульсного режима возбуждения линейного электродвигателя // *Электротехника*.– 1994.– №10.–С.3-9.

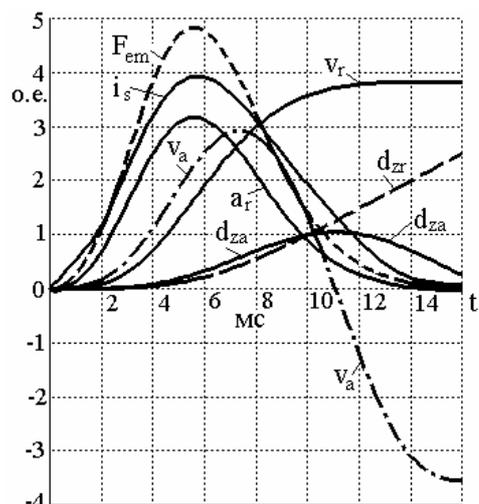


Рис.3. Временные функции величин, характеризующих работу ЛИЭД