

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Введение. Рассматриваемый линейный импульсный электродвигатель (ЛИЭД) уже представлялся в [1-3] и предназначен для невзрывной сейсморазведки [4]. Он используется в качестве рабочего органа импульсного электромеханического сейсмоисточника, служащего для возбуждения в земной коре сейсмических колебаний при поиске нефти, газа и других полезных ископаемых.

Принцип действия электромеханического сейсмоисточника поясним с помощью структурной схемы электропитания и конструкции ЛИЭД, которые представлены на рис.1 и рис.2.

Электрическая энергия поступает от источника питания (синхронного генератора, аккумуляторов), запасается в емкостном накопителе энергии, формируется в виде мощных импульсов тока и подается на обмотки ЛИЭД. Здесь энергия электрическая преобразуется в механическую, реализуемую в виде импульсов силы, передаваемых грунту и возбуждающих в нем упругие колебания.

Основными элементами двигателя являются порождающие силовое взаимодействие якорь и реактор. На рис.2 показано исходное положение реактора и чередующееся направление тока в обмотках, что обеспечивает заданное направление сил электромагнитного происхождения F_{em} в рабочем режиме при подаче импульса тока. Преобладающее движение вверх под действием развиваемого импульса силы осуществляет реактор. Его отскок ограничивает и демпфирует амортизатор, а рабочее воздействие на грунт, вызывающее сейсмические колебания, оказывает

силовая «отдача» якоря, который перемещается на расстояние, равное упругой деформации грунта и составляющее несколько миллиметров.

К основным функциональным параметрам электромеханического сейсмоисточника [1,2,5], как и вообще линейных электромеханических преобразователей импульсного действия [6], относятся амплитуда механической силы $F_{em\ max}$, длительность импульса t_{imp} , а также интегральный по времени t импульс силы

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

Аналитический расчет этих и других параметров по [1] для рассматриваемого ЛИЭД сопряжена со значительными допущениями и может служить только в качестве грубой исходной оценки. Для более реалистичной оценки задача должна решаться с одновременным учетом электромагнитных, механических и тепловых динамических процессов, причем часть из которых связана с нелинейно изменяющимися параметрами.

Постановка задач исследования. Целью данной работы является разработка математической модели, характеризующей рабочий импульсный режим представленного ЛИЭД с учетом совокупности электромагнитных, механических и тепловых процессов, которая позволит в дальнейшем производить анализ этого режима с возможностью варьирования комплексом необходимых параметров при учете их нелинейных взаимосвязей.

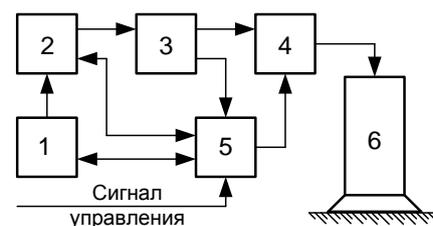


Рис. 1. Структурная схема электромеханического сейсмоисточника: 1 – источник электропитания; 2 – зарядное устройство; 3 – емкостной накопитель; 4 – тиристорный коммутатор; 5 – блок управления; 6 – ЛИЭД

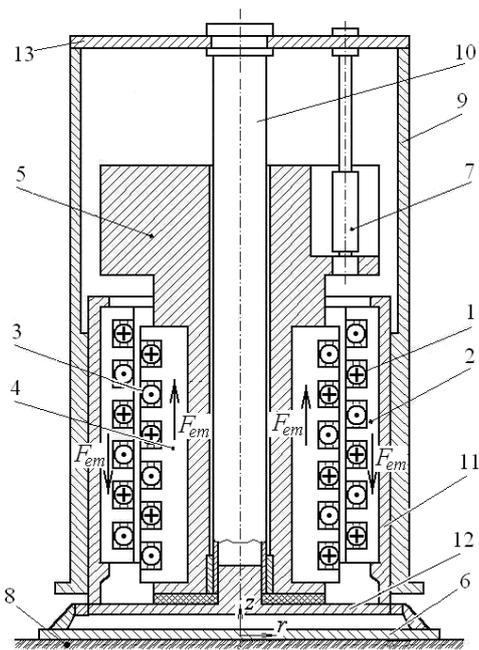


Рис.2. Устройство ЛИЭД: 1, 3 – кольцевые обмотки якоря и реактора; 2, 4 – коаксиальные шихтованные сердечники якоря и реактора; 5 – внутренний каркас реактора, совмещенный с инерционной массой; 6 – опорный конус; 7 – амортизатор; 8 – грунт; 9 – корпус наружный; 10 – колонна направляющая; 11 – корпус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

Материалы исследования. Учитывая изложенное, а также другие аспекты конструкции и принципа действия ЛИЭД, представим основные величины, влияющие на процесс его работы, и одновременно отметим основные допущения, позволяющие исключить мало влияющие факторы.

Якорь через свой корпус связан жестко с плитой и опорным конусом и их можно рассматривать как единую механическую систему с массой m_a . Реактор вместе со своим каркасом и инерционной массой образуют вторую механическую систему и имеют массу m_r . Наружный корпус, верхний щит и направляющая колонна образуют еще одну механическую систему – стационарную с массой m_c , 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 .

Взаимодействие системы реактора со стационарной системой осуществляется через гидравлический амортизатор, но это происходит только после рабочего хода реактора с целью безударного возврата реактора в исходное положение. Рабочий ход реактора составляет половину полюсного деления (полюсное деление τ_p – шаг между осями соседних зубцов якоря или реактора). В исходном положении реактора (рис.2) сила F_{em} максимальна [3] и на этом ходе сохраняет свое направление (или знак).

При вступлении реактора во воздействие со стационарной механической системой через амортизатор происходит подскок последней. Нагрузкой ЛИЭД является грунт, который, обладая инерционными и упруго-вязкими свойствами [4,5], представляет собой механический колебательный контур, возбуждаемый импульсами силы.

Обмотки ЛИЭД и питающий их емкостной накопитель являются взаимосвязанной электромагнитной системой, схема которой представлена на рис.3. Уравнение электрического равновесия для этой электрической цепи имеет вид:

$$\frac{d\Psi(\zeta, i)}{dt} + (R_r(\theta) + R_a(\theta) + R_0) \cdot i(t) + L_0 \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C_E} \int_0^t i(t) dt = U_{C0}; \quad (2)$$

где $\Psi = \Psi_r + \Psi_a$ – результирующее магнитное потокосцепление электрической цепи, складывающееся из полных магнитных потокосцеплений обмоток реактора Ψ_r и якоря Ψ_a , причем все зависят от временных функций взаимного аксиального смещения $\zeta(t)$ реактора и якоря и тока $i(t)$ в их последовательной цепи; $\frac{d\Psi}{dt}$ – производная результирующего магнитного потокосцепления в таких условиях

расписывается как $\frac{d\Psi}{dt} = \frac{\partial\Psi}{\partial\zeta} \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial\Psi}{\partial i} \frac{di}{dt}$; $R_r(\theta)$ и $R_a(\theta)$ – со-

противления обмоток реактора и якоря, являющиеся функциями их температуры θ ; R_0 и L_0 – сопротивление и индуктивность подводящих кабелей; C_E – емкость конденсаторов; U_{C0} – начальное напряжение заряженных конденсаторов.

В интервале времени, соответствующем рабочему ходу реактора, можно записать для механических систем реактора и якоря следующие уравнения:

$$F_{em}(\zeta, i) = m_r \left(\frac{dv_r}{dt} + g \right) + F_{fr r} + F_{ad in r}; \quad (3)$$

$$F_{em}(\zeta, i) = m_a \left(\frac{dv_a}{dt} - g \right) + F_{gr} + F_{fr a} + F_{ad in a}, \quad (4)$$

где $F_{em}(\zeta, i)$ – электромагнитная сила взаимодействия якоря и реактора; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; F_{gr} – упругая сила сопротивления грунта под опорной плитой; $F_{fr r}$, $F_{fr a}$ – силы динамического трения реактора и якоря; $F_{ad in r}$, $F_{ad in a}$ – силы аэродинамического сопротивления реактора и якоря.

Система нелинейных дифференциальных уравнений (2)-(4), дополненная необходимым комплектом начальных условий, может быть решена одним из численных методов, например, методом Рунге-Кутты 4 порядка. И здесь основная проблема заключается в предварительном или пошаговом определении величин, входящих в эти уравнения.

Нелинейные функции магнитного потокосцепления $\Psi(\zeta, i)$ и электромагнитной силы $F_{em}(\zeta, i)$, зависящие от взаимного смещения реактора и якоря и тока в их обмотках, могут быть подготовлены заранее в числовой форме многовариантными расчетами магнитного поля численным методом с учетом

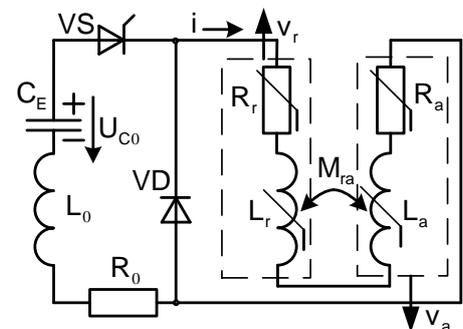


Рис.3. Электрическая схема замещения ЛИЭД

насыщения магнитопровода ЛИЭД, как это уже сделано в [3,7]. Причем оперировать в уравнении (2) следует именно с магнитными потокосцеплениями, а не с коэффициентами самоиндуктивности L_r , L_a и взаимной индуктивности M_{ra} обмоток (рис.3), которые в условиях нелинейной системы теряют свой смысл.

Учет температурной зависимости сопротивлений $R_r(\theta)$ и $R_a(\theta)$, а также их теплоемкостей может быть выполнен при импульсном возбуждении в предположении адиабатического нагрева обмоток, как это делалось в [8].

Взаимное смещение реактора и якоря определяется как сумма абсолютных смещений каждого:

$$\zeta(t) = \Delta z_r(t) + \Delta z_a(t),$$

где частные смещения реактора и якоря из условно принятых нулевых положений при $t = 0$:

$$\Delta z_r = \int_0^t v_r dt; \quad \Delta z_a = \int_0^t v_a dt.$$

Силы динамического трения реактора и якоря, а также упругой реакции грунта можно определить приближенно:

$$F_{fra} = k_{fr r} v_r; \quad F_{fra} = k_{fr a} v_a; \quad F_{gr} = k_{res} \Delta z_a,$$

где $k_{fr r}$, $k_{fr a}$ – коэффициенты динамического трения, k_{res} – коэффициент упругости грунта.

Сила аэродинамического сопротивления реактора по примеру [6]

$$F_{adnr} = 0,125 \pi \gamma_a \beta_a d_{rm} v_r^2,$$

где γ_a – плотность воздуха; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления, максимальный диаметр ускоряемых элементов.

Для относительно мало перемещающегося якоря эта сила F_{adna} , по сравнению с другими силами, может быть принята пренебрежимо малой.

Выводы. Представленная математическая модель достаточно полно описывает рабочий импульсный режим ЛИЭД и является основанием для проведения расчетного анализа этого режима. Первичными функциями, которые должны быть определены, являются функции тока $i(t)$ и скоростей перемещения реактора $v_r(t)$ и якоря $v_a(t)$. Остальные величины являются их наследниками и определяются по достаточно строгим алгоритмам и формулам. Из представленного материала очевидно, что точность решения задачи анализа рабочего режима ЛИЭД в решающей степени зависит от точности выражений различных величин, входящих в уравнения (2), (3) и (4), и требует очень объемной и кропотливой подготовительной работы.

Литература.

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. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 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 // Електротехніка і електромеханіка.–2008.–№3.–С.41-44.
3. Милых В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // Електротехніка 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. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії.– Харків: НТУ «ХПИ».–2006.–260 с.
7. Милых В.И., Ткаченко С.В. Анализ магнитного поля в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний // Електротехніка і електромеханіка.–2009.–№2.–С.43-47.
8. Милых В.И. Исследование импульсного режима возбуждения линейного электродвигателя // Електротехніка.– 1994.– №10.–С.3-9.

Milykh V.I., Tkachenko S.V.

Ukraine, Kharkov, NTU «Kharkov polytechnic institute»

Mathematical model of linear impulse electric motor for seismic oscillations source

Construction of linear impulse motor, the structure of its electric power schematic, and also electric replacement schematic have been presented. On this background non-linear system of differential equations which present motor functioning has been assembled. This system includes aggregation of associated electromagnetic and mechanical parameters. The most complex function is the function of magnetic flux linkage, which depends on mutual displacement of motor armature and motor reactor.