### УДК 621.318.3.004.4

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОУДАРЕНИЯ ЯКОРЯ С ИНДУКТОРОМ В ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ СЕЙСМОИСТОЧНИКЕ

А.С. Ануфриев<sup>1</sup>, В.П. Певчев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup> Тольяттинский государственный университет Россия, 445020, Самарская обл. г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

Аннотация. Во многих устройствах при срабатывании возникают соударения массивных элементов. Соударение может быть как одним из основных этапов процесса срабатывания, определяющим передачу механической энергии в нагрузку, так и нежелательным фактором, тем не менее ограничивающим ресурсные параметры. Расчет возникающих при соударениях сил и механических напряжений весьма важен. В статье предложена компьютерная модель для расчета процесса соударения массивных элементов источника сейсмических сигналов. Модель представлена в виде схемы, включающей механическую и акустическую подсистемы. Она позволяет с помощью простых действий группировать в одном расчете процессы, протекающие в подсистемах различной физической природы. Модель позволяет выполнять многовариантные исследования устройств, у которых в процессе срабатывания большое значение имеют этапы передачи энергии посредством ударного взаимодействия массивных элементов, а также иных устройств, характеристики которых в той или иной мере определяются наличием взаимодействий ударного типа.

**Ключевые слова**: аналогии, акустическая схема, двухполюсный схемный элемент массы, дуальное преобразование, взаимодействие, компьютерная модель, короткоходовой электромагнитный двигатель, механическая схема, обобщенные координаты, параметры, удар, сейсмоисточник, сейсморазведка.

При разработке специальных электромеханических устройств, таких как мощные виброударные стенды, молоты, источники сейсмических колебаний и пр., одной из проблем является получение данных о механических силах, напряжениях и деформациях конструкции. Если устройства выпускаются малыми сериями при ограниченных времени и финансировании исследований, то эту информацию зачастую невозможно получить в ходе физических экспериментов. Получение аналитических выражений для расчета механических сил и напряжений, возникающих при соударениях имеющих сложную конструкцию элементов, без значительного объема экспериментальных данных возможно лишь с очень грубыми допущениями, снижающими достоверность результата. Для решения этой проблемы целесообразны численные расчеты частных случаев – вариантов конструкции и режима работы.

Существуют два основных подхода к численному расчету с использованием либо сеточной модели, либо схемы замещения. Сеточная модель может быть реализована с помощью универсальных программ, например таких, как Ansys [1],

Ануфриев Андрей Сергеевич, аспирант.

Певчев Владимир Павлович (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Промышленная электроника».

Nastran [2]. Однако стандартное оснащение их подсистем, моделирующих механические напряжения, позволяет оперировать нагружающими конструкцию силами, но не скоростями движения. Программы типа FlowVision [3] позволяют задавать скорости, но ориентированы на анализ потоков в жидкостях и газах. Кроме того, из-за сложности этих универсальных программ и значительных затрат времени на моделирование динамических процессов их рационально использовать лишь при проверке достоверности результатов, получаемых иными способами. Для устройств, серийный выпуск которых не предполагается, оказываются нецелесообразными также разработки специальных программ, реализующих сеточные модели, если это не является задачей, например, диссертационного исследования.

Если допустить не снижающее достоверности результата уменьшение точности, то для первого приближения указанных расчетов могут быть рекомендованы более простые в разработке и использовании схемные модели [4]. При их применении доступны многовариантные исследования объекта с различными модификациями конструкций и режимов работы, позволяющие компенсировать снижение точности возможностью быстрого получения разнообразной информации о нем. Кроме того, схемные модели позволяют с помощью простых действий группировать в одном расчете процессы, протекающие в подсистемах различной физической природы: электрической, магнитной, акустической, механической [5, 6].

#### Объект исследования

В нефтегазовой сейсморазведке для создания сейсмических волн, распространяющихся в земной коре на глубину до 5–7 км, в настоящее время используются импульсные источники сейсмических воздействий (сейсмоисточники) «Енисей» [7] и «Геотон» [8], построенные на основе короткоходового электромагнитного двигателя [9]. Они создают импульсы силы воздействия на поверхность в несколько десятков тонн с длительностью в несколько миллисекунд и высокой идентичностью создаваемых сейсмических колебаний [20].



Рис. 1. Силовой модуль электромагнитного сейсмоисточника

На рис. 1 приведена схематично конструкция силового модуля такого сейсмоисточника. Он содержит индуктор 1 с обмоткой возбуждения 2 и якорь, консоли 4 которого опираются на стойки размещенного на поверхности грунта излучателя 5. Индуктор 1 с прикрепленным к нему и опирающимся на излучатель пригрузом 6 расположен с зазором  $\delta$  между нижней плоскостью якоря и полюсами индуктора. Начальная величина зазора  $\delta_0$  составляет (4–5)·10<sup>-3</sup> м.

При пропускании тока по обмотке 2 в магнитопроводах якоря и индуктора создается сила f притяжения якоря к индуктору. Через стойки и излучатель импульс механического воздействия перездается на грунт, а индуктор с пригрузом 4 подлетают вверх. Для рассматриваемых импульсных сейсмоисточников основным является режим работы со значительными паузами между воздействиями (2–6) с. Поэтому такие параметры, как масса пригруза 6 и величина механической энергии воздействия, подобраны таким образом, что после полного выбора зазора между якорем и индуктором происходит их соударение и далее якорь двигается вместе с индуктором. Они вместе подлетают на (2–5)·10<sup>-2</sup> м, после чего возвращаются в исходные положения под действием силы тяжести. При возврате пригруз соударяется с излучателем, а консоли якоря – со стойками излучателя. В ходе эксплуатации из-за многократных ударов в якоре накапливаются усталостные напряжения, приводящие к его ускоренному разрушению.

Для формирования импульса тока в обмотке 2 используется схема, приведенная на рис. 2 [10]. Обмотка (здесь Y) зашунтирована диодом VD и присоединена через тиристор VS к накопителю энергии – электрическому конденсатору C, заряженному до необходимого напряжения (зарядное устройство не показано). При открывании в момент времени  $t_0$  тиристора VS конденсатор C за время  $t_0-t_P$ , составляющее  $(1,5-2)\cdot 10^{-3}$  с, разряжается на обмотку Y. Протекание тока по виткам обмотки сопровождается появлением магнитного потока  $\Phi$ , замыкающегося вокруг обмотки через зазор  $\delta$  и по магнитопроводам индуктора и якоря, и созданием между ними силы f притяжения. Большая скорость изменения магнитного потока, соответствующая указанному значению  $t_P$ , усложняет конструкцию якоря и индуктора. Их магнитопроводы выполнены в виде пакетов листов электротехнической стали, которые заключены в сварные стальные каркасы [11, 12].



Рис. 2. Система питания электромагнитного двигателя сейсмоисточника: *а* – формирователь импульсов тока; *б* – диаграммы работы

Особенностью режима работы сейсмоисточника при использовании описанной схемы является то, что в момент  $t_{\delta}$  полного выбора зазора между якорем и индуктором и далее ток в обмотке электромагнитного двигателя не равен нулю.

Из-за этого якорь не может отскочить от индуктора, то есть их соударение носит неупругий характер. В соответствии с теоремой потерянных скоростей Карно – Остроградского выделившаяся при соударении энергия Δ*A* [13]

$$\Delta A = \frac{1-K}{2(1+K)} [m_1(v_{11}-v_{12})+m_2(v_{21}-v_{22})],$$

где *К* – коэффициент восстановления: *К*=0 при абсолютно неупругом ударе и *K*=1 при абсолютно упругом ударе;

*m*<sub>1</sub>, *m*<sub>2</sub> – массы соударяющихся тел;

*v*<sub>11</sub>, *v*<sub>21</sub> – скорости движения масс до удара;

*v*<sub>12</sub>, *v*<sub>22</sub> – скорости движения масс после удара, максимальна при *K*=0.

При частично-упругом соударении  $\Delta A$  уменьшается с ростом *K*. Отметим, что из-за наличия тока в обмотке становится также больше сила соударения консолей якоря со стойками излучателя при возврате элементов сейсмоисточника в исходное положение.

При составлении схемы, моделирующей соударение якоря с индуктором, не будем учитывать силы веса элементов. В импульсных сейсмоисточниках эти силы в сотни раз меньше сил соударения. Не будем учитывать также пластические деформации в зоне контакта соударяющихся якоря и индуктора, так как в практике эксплуатации сейсмоисточников при скорости встречного движения до 2,5 м/с таких деформаций выявлено не было. Энергия соударения якоря с индуктором рассеивается в процессе затухания возникающих в их конструкции упругих колебаний – акустических. По данным эксперимента, их частота составляет (2–2,5)·10<sup>3</sup> Гц, а амплитуда ускорений достигает 10<sup>3</sup> м/с<sup>2</sup>. Создается также сильный шум в воздухе, а накапливающиеся в силовом каркасе якоря усталостные напряжения приводят к его ускоренному разрушению.

Основа предлагаемой схемы, моделирующей соударение якоря с индуктором в момент  $t_{\delta}$ , приведена на рис. 3. Здесь  $m_1$  и  $m_2$  – массы соударяющихся индуктора и якоря, представленных двухполюсниками, соединенными «неподвижными» полюсами с системой отсчета [17]; f – электромагнитная сила; AC – акустическая подсистема, моделирующая затухающие колебания в конструкции. В сейсмоисточниках «Енисей» и «Геотон» значения скоростей движения индуктора и якоря в момент  $t_{\delta}$  составляют соответственно  $v_1$ =1,2 м/с,  $v_2$ =1 м/с. При необходимости расчета всего процесса срабатывания сейсмоисточника от момента  $t_0$  эта схема дополняется схемами замещения электрической и магнитной подсистем [6] и последовательно с блоком AC ставится управляемый ключ.



Рис. 3. Схема замещения системы соударяющихся масс

При описанных допущениях акустическая подсистема может быть промоделирована полостью (рис. 4a), на заполняющую которую рабочую среду посредством поршня осуществляется воздействие  $f_a$  от механической подсистемы [5].



Рис. 4. Акустическая подсистема; *а* – модель; *б* – акустическая схема; *в* – электрическая схема замещения

Механической силе  $f_a$  воздействия на поршень в рабочей среде акустической подсистемы противодействует избыточное давление  $p_a$ . В схеме на рис. 46 источник давления  $p_a$  фиктивный, так как энергия поступает в акустическую подсистему из механической, поэтому при объединении схем замещения этих подсистем он исчезнет. Дополнительный элемент d полости моделирует упругие свойства рабочей среды – акустическую податливость  $\xi_a$ . Тепло, возникающее при ее сжатии, передается во внешнюю среду, и этот процесс моделируется акустическим сопротивлением  $\chi_a$ . Рабочая среда перемещается на расстояние, намного меньшее условного диаметра зоны взаимодействия соударяющихся тел, поэтому ее инерционность и сопротивление перемещению учитывать не будем.

Определим величины параметров  $\xi_a$  и  $\chi_a$ . Податливость  $\xi_a$ 

$$\xi_a = \frac{h}{ES}$$

где *Е* – модуль упругости соударяющихся тел;

*h* – максимальная величина деформаций;

*S* – площадь соприкосновения тел.

Если принять, что за четверть периода колебаний, возникающих в сталкивающихся телах, с частотой

$$\omega = \sqrt{1/\xi_a m^*}$$

где  $m^*$  – эквивалентная масса [14] тел  $m_1$  и  $m_2$ :

$$m^* = 1/(1/m_1 + 1/m_2),$$

вся их кинетическая энергия запасается в  $\xi_a$ , то

$$\frac{m^* v_0^2}{2} = \frac{h^2}{2\xi_a}$$

где  $v_0$  – разность скоростей сталкивающихся тел. При этом величина податливости  $\xi_a$  может быть определена по формуле

$$\xi_a = \frac{m^* v_0^2}{S^2 E^2} \,.$$

Величина сопротивления  $\chi_a$  определяет величину потерь энергии в процессе соударения тел и влияет на форму возникающих в них затухающих колебаний. В теории механики для описания потерь при частично-упругих соударениях используется введенное Ньютоном понятие коэффициента *К* восстановления – это отношение импульса разгрузки к импульсу нагрузки. В справочниках в основном приводятся значения коэффициента восстановления для случая соударения с идеальной неподвижной опорой тел шарообразной формы, выполненных из различных материалов [16].

Получение выражения для определения  $\chi_a$  на основе коэффициента K – в целом весьма сложная задача. При незначительном искажении формы колебаний, то есть при K>0.9,

$$\chi_a = \frac{\omega m^*}{\pi} \left( 1 - K^2 \right)$$

В остальной части диапазона (0<K<0,9) с допустимой потерей точности можно определить  $\chi_a$  с помощью регрессивного анализа экспериментальных данных о возникающих в конструкции колебаниях. Например, для якоря сейсмоисточника «Енисей» сопротивление  $\chi_a$  в функции экспоненты определено по формуле

$$\chi_a \approx 1.7 \cdot 10^{-5} \omega m^* e^{4(1-K)}.$$

Для возможности совмещения расчета процесса соударения якоря с индуктором с расчетом прочих составных частей процесса срабатывания электромагнитного сейсмоисточника заменим акустическую и механическую схемы электрическими. При этом появится возможность моделировать процесс срабатывания сейсмоисточника, используя одну-единственную схему, объединяющую все его подсистемы, без применения интервальной модели с алгоритмом переключения с одной подсхемы на другую и определением на каждое такое переключение новых начальных условий. Так как топологии электрической и акустической схем одинаковы [5], то акустической схеме по рис. 46 соответствует электрическая схема замещения рис. 4e, содержащая элементы: аналогичный источнику давления источник напряжения  $u_a$  и аналогичные податливости  $\xi_a$  емкость  $C_a$ , а сопротивлению  $\chi_a$  сопротивление  $R_a$ .

Существуют две в целом равнозначные системы электромеханических аналогий [17]: «сила ↔ ток» и «сила ↔ напряжение». С использованием более популярной аналогии «сила ↔ напряжение» механическая схема рис. З превращается при дуальном перестроении в электрическую схему, приведенную на рис. 5, на которой индуктивностями моделируются массы элементов механической системы. Необходимость дуального перестроения обусловлена тем, что «сила» в схеме, приведенной на рис. 3, – это обобщенная координата потокового типа, а «напряжение» в получаемой электрической схеме – дифференциального [15].

Начальные для процесса соударения значения скоростей движения масс индуктора и якоря моделируются начальными значениями токов в индуктивностях  $L_1$  и  $L_2$ . К точкам *a* и *б* на рис. 5 присоединена электрическая схема замещения акустической подсистемы (см. рис. 4*в*). С программным обеспечением для численного расчета у полученной схемы может возникнуть конфликт, так как две индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  составляют замкнутый контур. Для разрешения указанного конфликта в этот контур должен быть добавлен ничего не моделирующий резистор с нулевым сопротивлением [4].



Рис. 5. Электрическая схема замещения

При использовании аналогии «сила  $\leftrightarrow$  ток» топология электрической схемы замещения механической системы такая же, как у приведенной на рис. 3 схемы, но теперь уже акустическая схема должна подвергаться дуальному перестроению – замене емкости индуктивностью, сопротивления – проводимостью, последовательного их соединения – параллельным. Масса моделируется электрической емкостью, и начальные для процесса соударения значения скоростей движения масс индуктора и якоря моделируются начальными значениями напряжений на соответствующих конденсаторах. Конфликт с программным обеспечением для численного расчета в такой схеме разрешается включением параллельно любому из этих конденсаторов ничего не моделирующего резистора с сопротивлением  $R \rightarrow \infty$ . Схема механической системы этого вида может быть получена дуальным перестроением схемы, приведенной на рис. 5.

Предложенная модель актуальна прежде всего для устройств, в процессе срабатывания которых соударения массивных тел являются этапом передачи энергии в нагрузку [18, 19]. Особое внимание обращаем на моделирование работы сейсмоисточников типа «падающий груз» с передачей энергии от ударника плите-излучателю в процессе ударного взаимодействия. В [14] рассмотрены особенности работы такого сейсмоисточника и было сделано предложение, что если удару придать характер частично-упругого с более высоким коэффициентом восстановления, то возможен более эффективный режим передачи энергии от ударника излучателю, чем в известных сейсмоисточниках типа «падающий груз».

#### Заключение

Расчет механических сил и напряжений, возникающих при соударениях элементов, имеющих сложную конструкцию, возможен с применением электрических схем замещения. С применением метода аналогий и дуального преобразования были получены схемы, объединяющие акустическую и механическую подсистемы исследуемого устройства в единую электрическую схему замещения. Для определения значений параметров элементов акустической схемы – податливости и акустического сопротивления – предложены аналитические выражения и регрессивный анализ экспериментальных данных о возникающих в конструкции колебаниях. Достоверность результатов моделирования может быть проверена натурными экспериментами с помещением датчиков в доступные места конструкции. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Руководство по основным методам проведения анализа в программе ANSYS. 399 с. [Электронный ресурс]. URL: http://old.bsau.ru/netcat\_files/File/CIT/manuals/ANSYS.pdf (дата обращения 21.04.2018).
- Расчет и оптимизация конструкций [Электронный ресурс]. URL: http://www.mscsoftware.ru/products/msc-nastran (дата обращения 21.04.2018).
- Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. 53 с. [Электронный ресурс]. URL: http://old.bsau.ru/netcat\_files/File/CIT/manuals/Flow\_Vision.pdf (дата обращения 21.04.2018).
- 4. *Pevchev V.P.* The use of Micro-CAP software to simulate operating processes of electromechanical impulse devices / Russian Electrical Engineering. 2010. Vol. 81. № 4. P. 213–216.
- 5. *Кудинов А.К., Певчев В.П.* Схема замещения механоакустической системы сейсмоисточника с мультипликатором // Вестник Донского государственного технического университета.— 2011.— Т. 11. № 3(54).
- 6. *Кудинов А.К., Певчев В.П.* Составление схем замещения электромагнитных систем // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 32–36.
- 7. Детков В.А., Ивашин В.В., Щадин П.Ю. Импульсные электромагнитные сейсмоисточники «Енисей»: особенности технического решения и применения // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов, 2007. – № 4.– С. 13–14.
- Анкушев В.В., Гурьев С.В., Резвов В.И. Компания «ГЕОСЕЙС» представляет новый импульсный источник возбуждения «Геотон» // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов, 2003. – № 1. – С. 11–12.
- 9. Патент 2172496 РФ: МКИ Н 02 М 3/135. Импульсный электромагнитный привод невзрывного сейсмоисточника / Ивашин В.В., Певчев В.П.; заявл. 23.02.2000; опубл. в Бюл. № 23, 2001.
- 10. *Певчев В.П.* Особенности системы импульсного питания электромагнитного двигателя источника сейсмических волн // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2009. № 3.– С. 47–50.
- Певчев В.П. Выбор параметров элементов конструктивной схемы импульсного источника сейсмических волн // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 2. – С. 133–141.
- Певчев В.П. Анализ влияния механических нагрузок на конструкцию якоря короткоходового электромагнитного двигателя сейсмоисточника и возможностей их снижения // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 6.– С. 30–34.
- Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Ч. 2. Динамика: Учебник для технических вузов. М.: Высшая школа, 1984. 423 с.
- 14. Ивашин В.В. Электрическая схема-аналог ударного взаимодействия трех масс через согласующий механический преобразователь // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Труды II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Ч. 1. Тольятти: ТГУ, 2009. С. 372–374.
- Харкевич А.А. Избранные труды. В 3 т. Т. 1. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. – М.: Наука, 1973. – 399 с.
- 16. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для втузов. 10-е изд. М.: Высшая школа, 1986. 416 с.
- 17. Гамбурцев Г.А. О составлении электромеханических аналогий // Доклады Академии наук. 1935. № 8–9. С. 303.
- Певчев В.П., Позднов М.В., Прядилов А.В. Математическое моделирование работы электромагнитного сейсмоисточника со свободным разгоном якоря // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2011. – № 4(18). – С. 71–74.
- Патент 2466429 РФ: G01V 1/155. Импульсный электромагнитный источник сейсмических волн / Иванников Н.А., Ивашин В.В., Певчев В.П., Прядилов А.В.; Заявл. 04.05.2011; Опубл. 10.11.2012 в Бюл. № 31.
- Смирнов В.П. Технические средства и содержание проверки источников ряда «Енисей» в цикле накопления одиночных и групповых воздействий // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов, 2005. – № 4. – С. 38–45.

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2018 г.

## MODELING OF THE PROCESS OF COLLISION OF THE ARMATURE WITH THE INDUCTOR IN THE PULSED ELECTROMAGNETIC SOURCE OF SEISMIC WAVES

# A.S. Anufriev<sup>1</sup>, V.P. Pevchev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara State Technical University 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

<sup>2</sup> Toll'yatti State University 14, Belorusskaya st., Toll'yatti, 445020, Russian Federation

Abstract. In many devices when triggered arise impact a massive elements. The impact can be as one of the main stages of the process of operation, determining the transmission of mechanical energy to the load, also unwanted constraint resource settings. These required when calculation of collision force and mechanical stress is very important. The article proposed a computer model for calculating process of impact of massive elements of seismic waves source. The model is presented in the form of a diagram, including mechanical and acoustic subsystems. It allows using simple actions to group in one calculation processes in the subsystems of different physical nature. The model allows us to perform multiple test devices, which is in the process of actuation are very important stages of energy transfer by shock-interaction of the massive elements, and other devices, the characteristics of which are to some extent determined by the presence of interactions of shock type.

**Keywords**: analogy, acoustic circuit, bipolar circuit element of the mass, dual conversion, interaction, computer model, short stroke electromagnetic engine, mechanical circuit, generalized coordinates, parameters, impact, source of seismic waves, seismic exploration.

Andrey S. Anufriev, Postgraduate Student. Vladimir P. Pevchev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.