

**С.П. МОСТОВОЙ**, к-т физ.-мат. наук, доц., НТУ "ХПИ"

## **ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В статті запропонована розрахункова модель для визначення параметрів імпульсу акустичного тиску, який створює випромінюючий перетворювач енергії індукційно-динамічного типу. Модель побудована з використанням методів електромеханічних аналогій. Наведено порівняння розрахункових і експериментальних даних.

In the article a calculation model is offered for determination of parameters of impulse of acoustic pressure, which creates transformer of energy of induction-dynamic type. A model is built with the use of methods of electroanalogs. Comparison over of calculation and experimental data is brought

Составным элементом современной аппаратуры для геофизических исследований дна океана является источник сейсмических сигналов. Диапазон частот 500 Гц...10 кГц перекрывается электроискровыми и электродинамическими источниками на основе индукционно-динамических преобразователей, известными под названием "спаркер" и "бумер" [1, 2]. При этом опытным путем установлено, что источники типа "бумер", обладают более высокой стабильностью характеристик и большим ресурсом.

Интерес к электродинамическим источникам в последнее время значительно вырос в связи с расширением работ по поиску нефти, газа и железомарганцевых конкреций. Широко используемые для этих целей пневматические источники, работающие в диапазоне частот 5...150 Гц, обеспечивают значительную глубину исследования морского дна, но не позволяют получить детальную информацию о его строении. Высоочастотные пьезокерамические и магнитострикционные источники приводят к лучшему разрешению структур, но их излучение не проникает достаточно глубоко в грунт. Поэтому именно среднечастотные источники - "спаркер" и "бумер" – оказались весьма эффективными при геофизических исследованиях морского дна и структуры придонных осадков.

Для определения функциональных возможностей и области применения источников сейсмических сигналов целесообразным является наличие ясных и адекватных математических моделей таких источников, позволяющих на этапе проектирования учесть основные факторы, влияющие на работоспособность источников и позволяющие оценивать параметры выходного сигнала с достаточной точностью,

Для решения этих задач ниже приведены некоторые результаты теоретических и экспериментальных исследований источников

сейсмических сигналов на базе индукционно-динамических преобразователей (ИДП) для геофизических исследований на акваториях. Конструктивно импульсный индукционно-динамический преобразователь для сейсмоакустических исследований с плоской электромагнитной системой состоит из укрепленной на диэлектрическом основании плоской дисковой катушки и электрически изолированного от нее подвижного заземленного электропроводного проводящего диска. При подключении к катушке предварительно заряженного емкостного накопителя энергии в диэлектрическом зазоре между катушкой и диском возникает импульс радиального магнитного поля. В результате диск под действием давления этого магнитного поля отталкивается от катушки и, взаимодействуя с упругой средой, излучает сейсмический сигнал.

Для определения функциональных возможностей преобразователя в процессе генерации сейсмических сигналов предлагается рассматривать два взаимосвязанных процесса: процесс формирования силового импульса в электромагнитной подсистеме ИДП и процесс взаимодействия преобразователя с геологической средой. При этом, представляется целесообразным, рассмотреть преобразователя в виде электромагнитной и механической подсистем, которые взаимодействуют через электромагнитное поле связи таким образом, что оказывается возможным преобразование энергии электромагнитного поля в энергию упругих колебаний среды.

Электромагнитная подсистема ИДП характеризуется такими основными параметрами:  $L_{ИДП}, R_{ИДП}, S_k, C, U_c, b, \omega_0$  –индуктивностью ИДП, активным электрическим сопротивлением преобразователя, площадью катушки (с внешним  $r_1$  и внутренним  $r_2$  радиусами намотки), величиной электрической емкости накопителя энергии, зарядным напряжением, толщиной проводника катушки, эквивалентной частотой разрядного тока, численные значения которых при известных конструктивных соотношениях могут быть определены, например, из [3].

Механическая система преобразователя характеризуется его геометрическими размерами и физическими свойствами материала диска, условиями механического заземления и параметрами нагрузки преобразователя - свойствами геологической среды.

Для моделирования процесса генерации акустического колебаний импульсным индукционно - динамическим преобразователем воспользуемся методом электромеханических аналогий, который базируется на подобии дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы в электротехнике, механике, акустике. Сущность метода заключается в составлении механических цепей исследуемого объекта, в нашем случае ИДП, и их электрических схем-аналогов с последующим моделированием динамических процессов объекта методами, принятыми в электротехнике. Более разработанной и

используемой при исследовании механических систем является система электромеханических аналогий «сила-напряжение». Это обусловлено тем, что источники силы моделируются источниками Э.Д.С., а полное комплексное сопротивление электрической цепи соответствует полному механическому сопротивлению, при этом размерности электрической цепи –аналoga соответствуют размерности элементов механической цепи [4].

Рассмотрим основные свойства механической подсистемы ИДП. Отметим, что аналогично гидроакустическим излучателям других типов, работающим на колебаниях изгиба, наиболее эффективно ИДП функционирует при следующем конструктивном соотношении:  $a_0 \leq 0,2r$ , которое связывает основные геометрические размеры диска – его толщину  $a_0$  и радиус  $r$ . Если это условие не выполняется, т.е. диск становится относительно "толстым" и, как следствие, более жестким, деформации изгиба уменьшаются и эффективность преобразователя снижается [5].

Для определения основных акустических параметров ИДП с помощью эквивалентной электромеханической схемы оценим его эквивалентные параметры: массу  $m_{экр}$ , гибкость  $c_{экр}$  и сопротивление  $R_s$ . Известно, что их определяют через формы колебаний, размеры и упругие параметры излучающего элемента. На частотах до и вблизи первого механического резонанса форма осесимметричных колебаний круглых заземленных пластин описывается функцией [6, 7]:

$$\varphi(\Delta r) = \left( 1 - \left( \frac{\Delta r}{r} \right)^2 \right)^2, \quad (1)$$

где  $\Delta r$  - текущий радиус точки на поверхности диска.

Эквивалентные масса и гибкость преобразователя в этом случае выражаются в следующем виде:

$$m_{экр} = 0,18m; \quad (2)$$

$$c_{экр} = 0,0167r^2 / D,$$

где  $D = \frac{E(2a_0)^3}{12(1-\nu^2)}$  - изгибная жесткость диска;  $E, \nu$  - модуль

Юнга и коэффициент Пуассона материала диска;  $m$  - масса диска.

Форма колебаний заземленного упругого диска определяет также среднюю площадь излучающей поверхности  $S_{cp}$  диска, которую в соответствии с выводами работ [5, 7] для излучательных преобразователей

запишем в виде  $S_{cp} = 0,35S_{\delta}$ , где  $S_{\delta}$  - геометрическая площадь диска.

Это соотношение определяет сопротивление излучения преобразователя следующим образом:

$$R = 0,35Z_e S_{\delta} \quad (3)$$

где  $Z_e$  - волновое сопротивление воды.

При исследовании режима генерации сейсмических сигналов примем следующие допущения.

1. Электродинамическая сила, развиваемая ИДП, действует в течение первого полупериода импульса разрядного тока:

$$F(t) \neq 0 \text{ при } 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega_s},$$

$$F(t) = 0 \text{ при } t \geq \frac{\pi}{\omega_s}.$$

2. Диск ИДП испытывает упругую деформацию, а все остальные конструктивные элементы недеформируемые.

3. При соотношении  $\frac{2r}{\lambda} \cong 1$ , где  $\lambda$  - длина генерируемой волны, влияние акустической среды учтем с помощью активного сопротивления излучения  $R_s$  и соколеблющейся массы  $m_s$ , величины которых оценим по формулам для поршневого излучателя [8]:

$$R_s = 1,1 \cdot 0,35Z_e S_{\delta}; \quad (4)$$

$$m_s = 0,1\rho_{\delta}(2r)^{\frac{3}{4}}.$$

Таким образом, методами, принятыми в теории электрических цепей для электромеханической схемы-аналога режима генерации ИДП, составим систему дифференциальных уравнений, описывающую колебания электропроводного диска в жидкой среде под действием электродинамической силы разрядного тока емкостного накопителя энергии:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{m_s + m_{\text{экв}}} (F(t) - \nu R_s - U_{cd});$$

$$\frac{dU_{cd}}{dt} = \frac{v}{C_{экс}} ;$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_{ИДП}} (U_c - iR_{ИДП}) ; \quad (5)$$

$$\frac{dU_c}{dt} = -\frac{i}{C} ;$$

$$F(t) = \frac{\mu_0 i^2(t) S_k}{2b^2} ,$$

где  $L_{ИДП}, R_{ИДП}, S_k, C, U_c, b$  - параметры электрической подсистемы ИДП;  $F(t)$  - мгновенное значение электродинамической силы;  $v$  - скорость движения заземленного диска;  $U_{cd}$  - величина упругой силы "пружины" с гибкостью  $C_{экс}$ ;  $i$  - величина тока в разрядной цепи ИДП;  $U_c$  - значение напряжения емкостного накопителя.

Поскольку в начальный момент времени  $t = 0$ , ток в ИДП тоже равен нулю и диск неподвижен, начальные условия записываются в виде:  $v = U_{cd} = i = 0, U_c = U_0$ , где  $U_0$  - значение зарядного напряжения емкостного накопителя энергии. Решение системы (5) проводилось численными методами. Давление вблизи диска определялось по выражению  $P_{mo} = Z_b v$ , а на расстоянии  $\Delta h$  от диска -  $P = \frac{P_{mo} S_{cp}}{(\lambda \Delta h)}$  [7].

Анализируя полученные расчетные и экспериментальные данные, можно сделать следующие выводы о характеристиках излучаемого импульса давления и соответствия предложенной методике результатам эксперимента:

- развиваемое ИДП акустическое давление линейно зависит от подводимой электрической энергии (в исследуемом диапазоне частот и энергий);

- расхождение расчетных и экспериментальных амплитудных значений импульса давления не превышает 15 %, что является удовлетворительным для инженерных расчетов.

- превышение расчетных значений импульса давления над измеренными, по-видимому, может быть объяснено дифракционными явлениями, характеризующими свойства акустического излучения данного типа плоского излучателя;

- преобладающая частота в спектре импульса давления зависит от

параметров разрядного контура и приблизительно совпадает с удвоенной частотой импульса тока в ИДП;

- интенсивность излучаемого сигнала по оси ИДП линейно убывает с ростом расстояния.

В заключении отметим, что экспериментальная проверка ИДП проводилась в составе промысловых сейсмоакустических комплексов в условиях полевых геофизических работ по методике непрерывного сейсмического профилирования. Глубинность исследования илистого-глинистого участка акватории достигала 60-100 м при разрешающей способности, определяемой по мощности самых тонких пластов, различимых на записи, 0,15...0,20 м.

**Список литературы:** 1. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров В.Л. Сейсмические исследования на акваториях, - М.:Недра,1983.- 421 с. 2. Балашиканд М.И., Ловля С.А. Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях.- М.:Недра,1977.- 374с. 3. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов.- Харьков: Выща шк.,1977.- 198 с. 4. Тетельбаум И.М., Шлыков Ф.М. Электрическое моделирование динамикиэлектропривода механизмов.- М.:Энергия,1970.- 191с. 5. Свердлин Г.И. Гидроакустические преобразователи и антенны.- Л.: Судостроение,1988.- 200с 6. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки.- М.: Физматгиз,1953.- 636 с. 7. Богородский В.В. Подводные электроакустические преобразователи.- Л.: Судостроение,1983.- 245 с. 8. Аронов В.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики.- Л.: Энергоатомиздат,1990.- 272 с.