

**С.П. МОСТОВОЙ**, канд. физ.-мат. наук, доц., зам. зав. НИЧ НТУ „ХПИ”

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

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

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

Интерес к широкополосным импульсным сейсмическим источникам в последнее время значительно вырос в связи с расширением работ по поиску нефти, газа, железомарганцевых конкреций и геофизическими исследованиями на мелководном шельфе морей. 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. Высокочастотные пьезокерамические и магнитоотрицательные источники приводят к лучшему разрешению структур, но их излучение не проникает достаточно глубоко в грунт. Поэтому именно среднечастотные источники электроразрядного типа и созданные на основе разного вида электродинамических систем оказались весьма эффективными при геофизических исследованиях морского дна и структуры придонных осадков [1, 2].

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 электропроводящего 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 рассмотрение 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 акустических колебаний импульсным индукционно-динамическим преобразователем воспользуемся методом электромеханических аналогий, который базируется на подобию 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 – аналога 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  $m_{экс}$ , гибкость  $c_{экс}$  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]:

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

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

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

$$m_{экс} = 0,18m; \quad c_{экс} = 0,0167r^2 / D, \quad (2)$$

где  $D = E(2a_0)^3 / [12(1 - \nu^2)]$  - 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  $S_{cp} = 0,35S_0$ , где  $S_0$  - геометрическая площадь диска.

Это соотношение определяет сопротивление излучения преобразователя следующим образом:

$$R = 0,35Z_0S_0 \quad (3)$$

где  $Z_0$  - 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:

$$F(t) \neq 0 \text{ при } 0 \leq t \leq \pi / \omega_s, \quad F(t) = 0 \text{ при } t \geq \pi / \omega_s.$$

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

3. При соотношении  $2r / \lambda \cong 1$ , 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]:

$$R_s = 1,1 \cdot 0,35Z_0S_0; \quad m_s = 0,1\rho_0(2r)^{3/4}. \quad (4)$$

4. Расчет производится в течении времени приложения импульсного электромагнитного поля.

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:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{m_s + m_{экс}}(F(t) - \nu R_s - U_{co}); \quad \frac{dU_{co}}{dt} = \frac{\nu}{C_{экс}}; \quad \frac{di}{dt} = \frac{1}{L_{идп}}(U_c - iR_{идп});$$

$$\frac{dU_c}{dt} = -\frac{i}{C}; \quad F(t) = \frac{\mu_0 i^2(t) S_k}{2b^2}, \quad (5)$$

где  $L_{идп}, R_{идп}, S_k, C, U_c, b$  - параметры электрической подсистемы ИДП;  $F(t)$  - мгновенное значение электродинамической силы;  $\nu$  - скорость движения заземленного диска;  $U_{co}$  - 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:  $\nu = U_{co} = i = 0, U_c = U_0$ , где  $U_0$  - значение зарядного напряжения емкостного накопителя энергии. Решение системы (5) проводилось численными методами. Давление вблизи диска определялось по выражению  $P_{mo} = Z_b \nu$ , а на расстоянии  $\Delta h$  от диска -  $P = P_{mo} S_{cp} / (\lambda \Delta h)$  [7].

На рис. 1 приведены расчетные и экспериментальные значения параметров импульса акустического давления ИДП на расстоянии 1,0 м в зависимости от величины запасаемой электрической энергии и значения электрической емкости накопителя. Экспериментальные данные получены при измерении акустического поля ИДП типа ЭДИ-2 со следующими параметрами электромагнитной системы:  $r = 0,375$  м;  $r_1 = 0,29$  м;  $r_2 = 0,09$  м;  $b = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $a_0 = 1 \cdot 10^{-2}$  м. Измерения проведены с использованием калиброванного измерительного гидрофона на базе пьезоэлектрического приемника давления типа ПДС-21 с акустической чувствительностью 120 мкВ/Па. Регистрация сигнала осуществлялась на экране запоминающего осциллографа типа С8-13. На рис. 2 представлены осциллограмма импульса давления и соответствующий ему амплитудный спектр сигнала ИДП типа ЭДИ-3 с иными параметрами электромагнитной системы:  $r = 0,27$  м;  $r_1 = 0,21$  м;  $r_2 = 0,07$  м;  $a_0 = 1 \cdot 10^{-2}$  м;