

величиною граничного струму короткого замикання (7). Якщо витримка часу $t_{к.з.}$ відповідає $t_{дон.}$ (8), то порівнюємо час короткого замикання з часом витримки заданим програмно (9). Якщо витримка часу короткого замикання закінчилась видаємо сигнал на відключення в порт Р 1.0 (10). Витримка встановлюється в вихідне становище (11) і знову час порівнюється з заданим (12). Якщо час більший часу заданого програмно, то відбувається відключення вимикача. У випадку коли величина струму фази А менша величини струму фази В (4), порівнюються величини струмів фаз В і С (14). Якщо величина струму фази В більша за величину струму фази С, то величина струму фази В визначається, як максимальна (15). Далі повторюються дії (7-12). Якщо величина струму фази А менша за величину струму фази С, то максимальною визначається величина струму фази С (13) і далі повторюються дії (7-12). Якщо величина максимального струму не дорівнює величині граничного струму короткого замикання (7), то вона дорівнює величині граничного струму (16) і відбувається витримка часу перевантаження (17). Коли витримка часу перевантаження закінчується, то повторюються дії (10-12), а якщо витримка часу перевантаження не закінчилась, то повторюються дії (2-12).

Список літератури: 1. *Алиев И.И., Абрамов М.Б.*, Электрические аппараты. Справочник – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 2003. – 251с. 2. *Могилевский Г.В., Райнин В.Е., Сосков А.Г., Устименко Б.Ю.* Бесконтактные устройства защиты для низковольтных электрических аппаратов. – М., Энергия, 1971. – 88с. 3. *Грицук Ю.С., Ржевский А.Н., Грицук С.Ю.* Автоматизированная система управления для коммутационных исследований и испытаний электрических аппаратов // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2001. – Вып. 17.– С. 48-50. 4. *Грицук Ю.С., Кузнецов А.И., Ржевский А.Н., Грицук С.Ю.* Применение микроконтроллеров в схемах автоматизированного управления испытаниями электрических аппаратов // Вісник НТУ "ХПИ". – Харків: НТУ "ХПИ". – 2005. – Вып. 35. – С. 63-68. 5. *Грицук Ю.С.* Микропроцессорные устройства: Уч. пособие – Харьков: НТУ "ХПИ", 2007. – 280 с. 6. Семейство микроконтроллеров MSP430x1xx. Руководство пользователя: Пер. с англ. – М.: Серия "Библиотека Компэла". ЗАО "Компэл", 2004. – 368с. 7. <http://ielectro.ru>. 8. <http://eneq.ru>.

Поступила в редколлегию 27.05.2008

УДК 622. 24

А.Г. ГУРИН, д-р техн. наук,
С.П. МОСТОВОЙ, канд. физ.-мат. наук,
О.Н. ЯРМАК,
П.Е. КОВАЛЕК

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СТРУКТУРЫ ДОННЫХ ОСАДКОВ НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

Розглянуто процес формування гідроакустичних імпульсів у дальній зоні мембранних гідроакустичних випромінювачів при вивченні структури донних шарів ґрунту на шельфі моря в районі нафтових родовищ та експлуатації бурових платформ. Наведено аналіз завад, що спричиняють появу повторних відбиттів та спотворення сейсмограм.

Рассмотрен процесс формирования гидроакустических импульсов в дальней зоне мембранных гидроакустических излучателей при изучении структуры донных слоев грунта на шельфе моря в районе нефтяных месторождений и эксплуатации буровых платформ. Представлен анализ помех, которые создают появление повторных отражений и искажение сейсмограмм.

Постановка задачі. Поиски полезных ископаемых на шельфе моря, контроль за динамикой пород в зоне буровых платформ на шельфе моря, строительство инженерных сооружений связано с детальным изучением донных осадков, их структуры и мощности пластов. Наиболее пригодны для этих целей электродинамические излучатели мембранного типа, позволяющие излучать мощные гидроакустические импульсы со спектром 1-8 кГц и амплитудой, достаточной для проникновения этого импульса на глубину до 400-500 м по донным осадкам [1, 2]. Стабильность амплитуды и широкий диапазон спектра излучаемых импульсов являются их отличительной особенностью от применяемых в настоящее время пневматических и электрогидравлических излучателей [2]. Если первые имеют низкочастотный спектр излучения, то вторые - большой разброс спектра излучаемых частот из-за влияния условий возбуждения и состава среды. Высокая точность включения электродинамических излучателей позволяет их группировать, тем самым создавать более мощные акустические импульсы заданной направленности. Для этого необходимо, чтобы каждый излучатель в группе имел идентичные спектральные характеристики. Цель работы – изучить причины, влияющие на этот процесс путем анализа расчетных и экспериментальных данных, полученных в реальных условиях эксплуатации излучателей.

Формирование амплитуды гидроакустического импульса и его час-

тотного спектра. Конструкция электродинамического излучателя описана в [3] и является составной частью гидроакустических комплексов, в состав которых входит генератор импульсов тока, располагаемый на судне, и излучатели, буксируемые на специальных поплавках (катамаранах) и заглубленные в воду на 0,4÷1,0 м. Передача энергии от генератора к излучателю осуществляется коаксиальным кабелем. Излучатель преобразует накопленную в конденсаторах генератора электрическую энергию в энергию магнитного поля плоской катушки, которое воздействует на мембрану из электропроводного материала. Амплитуду импульса силы, воздействующей на мембрану, можно определить по формуле:

$$F_m = \frac{Cu^2}{2L_k} \frac{dL_\Sigma}{d\Delta}, \quad (1)$$

где C - емкость накопителя энергии, Ф; L_k - индуктивность разрядного контура конденсаторной батареи, Гн; u - зарядное напряжение, В; Δ - изоляционное расстояние между катушкой и мембраной; $\frac{dL_\Sigma}{d\Delta}$ - изменение эквивалентной индуктивности системы "катушка - мембрана" при движении мембраны.

Эквивалентная индуктивность излучателя, определяется как

$$L_\Sigma = \mu_o \pi \omega^2 \frac{d_e + d_i}{d_e - d_i} \left[\Delta + \frac{\delta_k + \delta_m}{2} \right], \quad (2)$$

где $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ - магнитная постоянная; $\delta_k = \sqrt{\frac{2\rho_k}{\omega\mu_o}}$ - глубина скин-слоя в

медном проводе катушки; $\delta_m = \sqrt{\frac{2\rho_m}{\omega\mu_o}}$ - глубина скин-слоя в материале элект

тропроводной мембраны; ρ_k, ρ_m - удельные объемные сопротивления материала катушки и мембраны; $\omega = 2\pi f$ - круговая частота разрядного тока, 1/с; Δ - воздушный зазор между плоскостями катушки и мембраны; d_e, d_i - наружный и внутренний диаметр плоской однослойной катушки. Она должна составлять порядка 50÷60 % индуктивности разрядного контура L_k , равного суммарной индуктивности элементов разрядного контура – накопителя энергии, коммутатора, кабельной передающей линии и излучателя.

После дифференцирования (2) и подстановки в (1) получим

$$F_m = \frac{Cu^2}{2L_k} \mu_o \pi \omega^2 (d_e + d_i) / (d_e - d_i). \quad (3)$$

Акустическое давление у поверхности мембраны

$$p_m = \frac{F_m}{S_m} = F_m \eta / \frac{\pi(d_e^2 - d_i^2)}{4}, \quad (4)$$

где S_m - излучающая поверхность мембраны; η - коэффициент, определяющий эффективность преобразования электромагнитного давления на мембрану в давление акустической волны.

$$\eta \approx \frac{\rho_{cp} C_3 S_m}{\sqrt{(r_{mp} + \rho_{cp} C_3 S_m)^2 + (\omega_1 m)^2}}, \quad (5)$$

где $\rho_{cp} C_3 S_m$ - сопротивление излучения; ρ_{cp} - плотность среды; ω_1 и m - частота и масса колеблющейся мембраны; r_{mp} - сопротивление сил трения материала мембраны.

Величина η заключена в интервале $0 \leq \eta < 1$ и зависит от способа закрепления мембраны (свободно опертая или закреплена по контуру), материала и конструкции мембраны, согласования частоты разрядного тока с ее собственной частотой.

С увеличением расстояния от излучателя давление акустической волны убывает и определяется как

$$p_\partial = \frac{P_m S_m}{\lambda r}, \quad (6)$$

где p_∂ - давление на расстоянии r ; λ - длина акустической волны, $\lambda = c_3 T_s = c_3 T_i / 2 = c_3 \pi \sqrt{L_k C}$, T_s - период звуковой волны; T_i - период разрядного тока; c_3 - скорость звука в воде; $T_s = T_i / 2$.

После подстановки перечисленных параметров получим:

$$p_\partial = \eta \frac{F_m}{\lambda \cdot r} = \eta \frac{F_m}{c_3 \pi \sqrt{L_k C}}. \quad (7)$$

Для максимальной передачи энергии исследуемой среде необходимо максимально повысить собственную частоту колебаний мембраны. Для круглой мембраны, закрепленной по контуру, уравнение собственных колебаний имеет вид [3]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + 2m_{mp} \frac{\partial U}{\partial t} = \alpha^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right), \quad (8)$$

где $U|_{t=0} = f(R_x)$; $\frac{\partial U}{\partial t}|_{t=0} = F(R_x)$; $U|_{R_x=R_0} = 0$; R - текущий радиус мембраны; R_0 - радиус края мембраны; m_{mp} - коэффициент вязкого трения;

$\alpha^2 = \frac{A}{\gamma}$; A - натяжение мембраны; γ - поверхностная плотность мембраны;

U - амплитуда колебаний мембраны.

Решение этого уравнения показывает, что собственные колебания мембраны определяются выражением:

$$U(R_x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k e^{-mt} \left(\sin \sqrt{\left(\frac{\alpha - \mu_k}{R} \right)^2 - m^2} \cdot t \right) \cdot J_0(\mu_k \cdot x), \quad (9)$$

$$\text{где } b_k = \frac{2U_0}{J_1(\mu_k) \sqrt{\left(\frac{\alpha - \mu_k}{R} \right)^2 - m^2}} \int_0^1 x J_0(\mu_k \cdot x) dx;$$

$$J_0(\mu_k \cdot x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\mu_k^{2n} \cdot x^{2n}}{2^{2n} (n!)^2};$$

$$J_1(\mu_k) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\mu_k^{2n+1}}{2^{2n+1} \cdot n! (n+1)!};$$

$$x = R_x / 2.$$

Полученные выражения свидетельствуют о том, что движение мембраны происходит по сложной зависимости. Функции $U_k(R_x, t)$ представляют стоячие волны, пучности и узлы которых располагаются по концентрическим окружностям. Узловые окружности получаются при тех значениях R_x , для которых

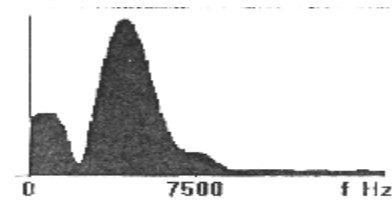
$$J_0(\mu_k \cdot x) = J_0\left(\mu_k \frac{R_x}{R}\right) = 0.$$

Кроме очевидного значения $R_x = R_0$ (край мембраны) это будут значения определяемые соотношениями:

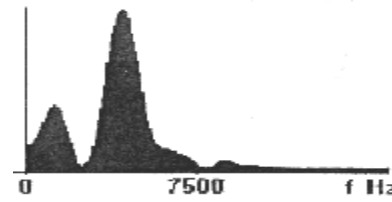
$$\frac{\mu_k \times R_{x1}}{R_0} = \mu_1; \quad \frac{\mu_k \times R_{x2}}{R_0} = \mu_2$$

Стоячая волна $U_k(R_x, t)$ имеет k узловых окружностей (считая и край мембраны). Между ними располагаются окружности пучностей. Они соответствуют тем значениям R_x , при которых функция $e^{-mt} J_0\left(\frac{\mu_k \cdot R_x}{R}\right)$ достигает максимума или минимума.

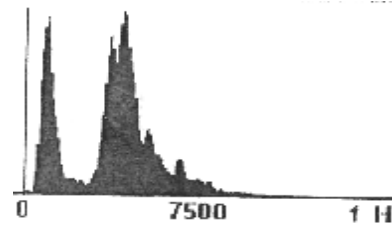
Экспериментальные исследования формирования гидроакустического импульса. При исследовании структуры донных осадков (рис. 1, 2) к излучателю предъявляется ряд требований. Главное – получить широкополосный спектр сигнала в диапазоне 1-8 кГц. Сигнал должен быть однополярным – первая половина сжатия должна нести максимум излучающей энергии, вторая – разрежения минимальной амплитуды.



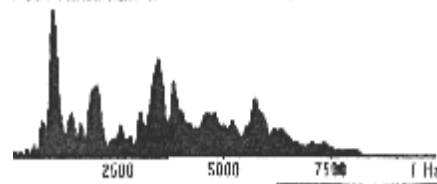
Спектр сигнала в интервале 1,0÷1,5мс



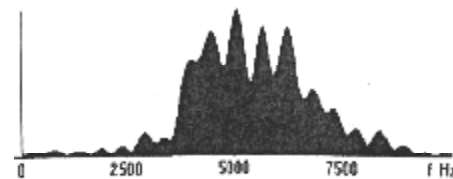
Спектр сигнала в интервале 1÷2,5мс



Спектр сигнала в интервале 1÷4мс



Спектр сигнала в интервале 4÷9мс



Спектр сигнала в интервале 11÷13мс

Рис. 1 Формирование спектра гидроакустического импульса при прохождении от излучателя к донным осадкам. Диаметр излучателя 540 мм. Глубина погружения излучателя 40 см, $U_0=2,5$ кВ, $C=50$ мкФ

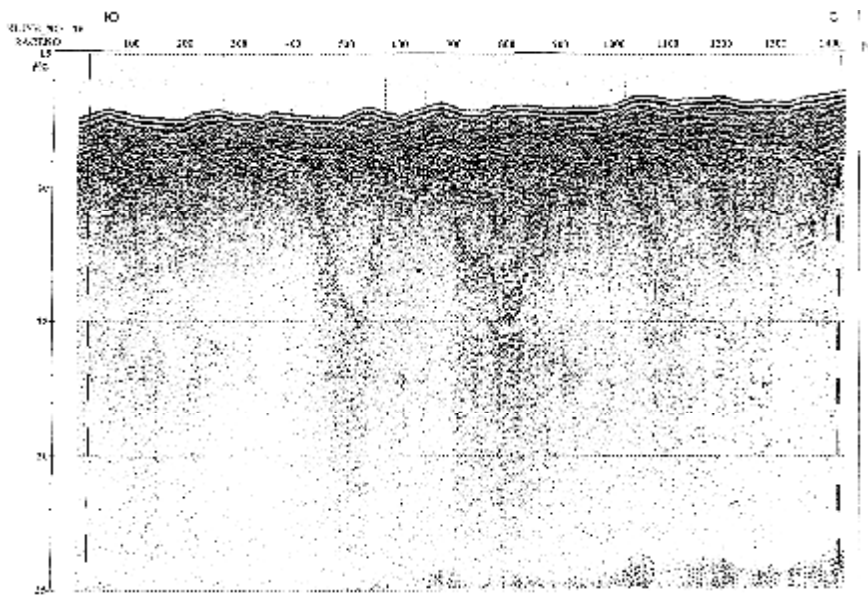


Рис. 2 Фрагмент профиля донных осадков, полученный с помощью электродинамического излучателя. Параметры излучателя: диаметр излучателя 540 мм, энергия излучения 156 Дж, зарядное напряжение 2,5 кВ, емкость накопителя 50 мкФ (из материалов ООО "Моринжгеология", г. Рига)

Это позволяет получить разрез дна без повторных отражений. Выполнение этих требований достаточно сложно, т.е. излучающая мембрана должна быть изготовлена из жесткого электропроводного материала и конструктивно иметь возможность рассеивать энергию волны разрежения, т.е. иметь диаметр, достаточный для формирования необходимого числа полуволн сжатия и затухать в процессе распространения по радиусу.

Исследовалось 4 конструкции излучателей с диаметром мембраны от 230 до 540 мм. Материал мембраны – алюминий мягкий, алюминий твердый и силумин. Лучшие результаты показали излучатели с силуминовой мембраной и из твердого алюминия (рис. 1). Мембраны из мягкого алюминия хорошо демпфировали обратные движения мембраны, создавая однополярный импульс давления, но не позволяли получить достаточную интенсивность высокочастотных составляющих.

Как было показано в [4], на формирование спектра сигнала в ближней зоне существенное влияние оказывают собственные частоты колебаний конструктивных элементов излучателя, излучение не только в направлении дна, но и в обратную сторону, со стороны заливки компаундом катушки и ее кабельного вывода. Демпфирование обратного излучения представляет важный этап формирования импульса в ближней зоне и зависит от объемного содержания компаунда (типа смолы, пластификатора, наполнителя и т.д.). Роль

наполнителя особенно важна, т.к. применяя материалы с разными упругими свойствами можно значительно повысить рассеивание энергии обратного импульса. На рис. 2 показан профиль дна, полученный с излучателем, в котором обратное демпфирование осуществлялось применением наполнителей с низкими упругими свойствами (резина, дерево и т.д.). Применение стекловолокна и стеклонитей позволяет получить механически прочную конструкцию, но влияние собственных частот колебаний этого композитного материала в воде требует дополнительных исследований.

Выводы.

1. Исследование спектрального состава гидроакустического импульса, возбуждаемого электродинамическим излучателем поршневого типа, показало необходимость учета как конструктивных, так и технологических факторов на форму сигнала.

2. В зависимости от геологических задач спектр излучения можно регулировать, изменяя жесткость излучающей мембраны, а также согласовывая его с ее собственными колебаниями.

3. Повторные отражающие импульсы от донных осадков можно исключить за счет ослабления волн-помех от дневной поверхности, т.е. за счет регулировки глубины погружения излучателя и демпфирования излучения с тыльной стороны излучающей мембраны.

4. Полученные экспериментальные результаты показывают возможность использования электродинамических излучателей при изучении нефте- и газозонности Азово-Черноморского шельфа Украины.

Список литературы: 1. Головачев Э.М. Прогнозные нефтегазоносные узлы в Азовском море. Комплексное освоение нефтегазовых ресурсов континентального шельфа СССР // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции 4-6 сентября 1990 г. - М. - 1990. - С.172-173. 2. Гладченко В.Я., Гурин А.Г., Мостовой С.П. Электродинамические источники гидроакустических импульсов для экологических и геофизических исследований на шельфе моря // Электротехника и электромеханика. - Харьков. - 2004. - № 4. - С. 100-104. 3. Гурин А.Г., Абубакер Али Шейхи. Волновые явления в мембране электродинамического излучателя гидроакустических импульсов // Вісник НТУ "ХПІ". Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка.- Харків: НТУ "ХПІ". - № 7. - 2008. - С. 39-45. 4. Еременко С.Ю. Собственные колебания и динамика композитных материалов и конструкций. - Киев: Наукова думка, 1992. - 184 с

Поступила в редколлегию 22.05.08