

ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НАЗЕМНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ С ПЛОСКИМИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

Наведені співвідношення, що описують зв'язок між параметрами розрядного кола конденсаторної батареї, що формують імпульс струму та вплив досліджуваного середовища на форму і спектральний склад ударного імпульсу, сформованого електродинамічним випромінювачем з плоскою випромінюючою системою котушок.

Приводятся соотношения, описывающие связь между параметрами разрядной цепи конденсаторной батареи, формирующей импульс тока, и влияние исследуемой среды на форму и спектральный состав ударного импульса, формируемого электродинамическим излучателем с плоской излучающей системой катушек.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Высоковольтные электроразрядные установки широко применяются при реализации разрядно-импульсных технологий для обработки материалов давлением, очистки и обеззараживания продуктов, биомедицинских исследованиях. Такие установки целесообразно использовать и для поиска полезных ископаемых путем изучения состояния верхних слоев твердой оболочки земли, морей и шельфов, структуры донных осадков внутренних водоемов. Электроразрядное оборудование, используемое для этих целей, должно позволять осуществление многократного генерирования одинаковых по амплитуде и форме зондирующих сигналов, позволяющих осуществить оценку времени распространения упругих волн, определить их скорости, расстояния до отражающих горизонтов, акустическую жесткость, коэффициенты отражения и поглощения упругих волн, спектральные характеристики среды. Основными направлениями исследований по совершенствованию высоковольтных электроразрядных установок, используемых для поиска полезных ископаемых, связаны с повышением эффективности процесса преобразования энергии и улучшением удельных энергетических характеристик за счет уменьшения габаритов и металлоемкости оборудования. Желаемые результаты могут быть получены путем создания специализированных разрядных систем, допускающих продолжительную непрерывную работу с постоянными характеристиками и имеющих узкую сканирующую диаграмму направленности, обеспечивающую требуемую точность определения параметров исследуемой среды. Наиболее полно поставленным требованиям отвечают электродинамические источники с плоскими излучателями, использующие энергию, накопленную в электрическом поле конденсаторов.

Вместе с тем, при создании наземных и морских излучателей сейсмических колебаний стремились получить одновременно и наибольшую силу и максимальную эффективность преобразования энергии, накопленной в конденсаторах, в энергию упругих колебаний в земле или энергию гидроакустического импульса в воде. При этом первая цель достигалась созданием мощных инерционных преобразователей, что закономерно уводило от достижения второй цели. Для преодоления указанного противоречия и разработки практических рекомендаций по снижению инерционности используемых передаточных звеньев и снижению силового воздействия на элементы установок, рассмотрим особенности возбуждения сейсмических сигналов электродинамическими источниками с плоскими индукционными преобразователями.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

В последние годы все больший интерес представляют сейсмоакустические методы воздействия на нефтеносные пласты с целью повышения нефтеотдачи и повышения дебита действующих скважин [1, 2]. При определении остаточных запасов нефти, выборе оптимального спектра акустического импульса, воздействующего на пласт, может быть использован опыт создания и эксплуатации невзрывных источников сейсмических колебаний наземного исполнения [3] для сейсморазведки полезных ископаемых. Наряду с газодинамическими, пневматическими, электрогидравлическими и другими видами излучателей, электродинамические излучатели с плоской излучающей мембраной позволяют:

- распределить давление по поверхности грунта с целью согласованной передачи в исследуемую среду импульса давления в области упругих деформаций [4];
- создавать направленное излучение группой излучателей [5];
- расширить диапазон излучаемых колебаний в сторону средне- и высокочастотных [6] благодаря малой массе излучающей мембраны (штампа), расположенной непосредственно на поверхности грунта без промежуточных передающих элементов [6];
- с высокой точностью синхронизировать момент подачи импульса давления от каждого отдельного и группы излучателей с приемной аппаратурой, что важно при накоплении информации и её обработке [7];
- регулировать амплитуду излучения и спектр путем формирования импульса тока в разрядной цепи конденсаторной батареи с учетом решаемых сейсмогеологических задач [8, 9].

Цель статьи – установление зависимости между параметрами сейсмоакустического импульса, электрической и механической системами его формирования.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В электродинамическом излучателе происходит превращение электрической энергии в механическую. Электродинамический излучатель имеет в своем составе накопитель и преобразователь электрической энергии. Его действие основано на многократном увеличении мощности, достигаемом путем медленного накопления энергии, поступающей от источника, и быстрого поступления ее в нагрузку, плоскую катушку, накладываемую на штамп, выполненный в виде массивной электропроводящей среды. При протекании импульсного электрического тока через плоскую катушку начинаются колебания штампа, вызываемые электродинамическими силами, возникающими в результате взаимодействия тока катушки и тока, индуцируемого в штампе. Штамп может быть выполнен и

в виде катушки, импульс силы в которой возникает в результате взаимодействия токов, протекающих в катушках. Электрическая схема электродинамического излучателя состоит из зарядного устройства, конденсаторной батареи, коммутатора, активного сопротивления разрядной цепи и плоских катушек.

Для исследования процессов преобразования энергии, происходящих в электродинамическом излучателе, предлагается следующая математическая модель системы излучатель-грунт. Математическая модель образуется соотношениями, описывающими связь между параметрами схемы, формирующими импульс тока, а также соотношениями, отражающими процессы, происходящие в электродинамическом преобразователе, и соотношениями, описывающими колебания грунта.

Процесс в разрядной цепи описывается уравнением равновесия напряжений:

$$\frac{d\psi}{dt} + L_3 i + \frac{1}{C_3} \int_0^t i dt = U_H. \quad (1)$$

Учитывая то, что **токоцепление** ψ является функцией времени t и перемещения x , определяемого суммой перемещения катушки x_1 и штампа x_2 , эквивалентная индуктивность $L_3(x)$ электродинамического излучателя равна

$$L_3(x) = L_1 + L_2 \pm 2M(x), \quad (2)$$

где L_1 и L_2 - собственные индуктивности излучателя; M - взаимная индуктивность.

Знак \pm в (2) определяется согласным или встречным включением индуктивно связанных катушек.

Запишем уравнение (1) в виде

$$L_3(x) \frac{di}{dt} + K_c(x) \frac{dx}{dt} \cdot i + R_3 i + \frac{1}{C_3} \int_0^t i dt = U_H, \quad (3)$$

где $K_c = \frac{dL_3(x)}{dx} = -2 \frac{dM}{dx}$.

Влияние относительного движения индуктора на ток в разрядной цепи представим в виде действия как бы вносимого сопротивления $R_{вн}$, включаемого последовательно с сопротивлением R_3 .

Величина $R_{вн}$ определяется соотношением

$$R_{вн} = K_{cx} \frac{dx}{dt} = K_{cx} V_x(t) = K_{cx} [V_x(0) + \Delta V_x(t)], \quad (4)$$

где $V_x(t)$, $V_x(0)$ - текущая и начальная скорости перемещения индуктора; $\Delta V_x(t)$ - изменение скорости перемещения индуктора.

Исходя из того, что $R_3 + K_{cx} V_x(0) \gg K_{cx} V_x(t)$ можно считать, что полное сопротивление разрядной цепи в процессе работы электродинамического излучателя является величиной постоянной. Поскольку L_3 практически остается постоянной величиной в процессе разряда, постольку можно считать, что разряд происходит в цепи с постоянными значениями R_3 , L_3 и C_3 .

Исходя из необходимости получения колебательного переходного процесса, параметры схемы должны выбираться таким образом, чтобы $R_3 < 2\sqrt{L_3/C_3}$. Решение уравнения (3) при таком соотношении параметров имеет следующий вид:

$$i(t) = \frac{U_0}{\omega_{ce} L_3} e^{-\delta t} \sin \omega_{ce} t, \quad (5)$$

где $\omega_{ce} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ - угловая частота синусоидальных колебаний, возникающих вследствие преобразования энергии электрического поля в энергию маг-

нитного поля и обратно, причем эти колебания сопровождаются потерей энергии в сопротивлении; $\omega_0 = 1/\sqrt{L_3/C_3}$ - резонансная угловая частота; $\delta = R_3/2L_3$; $R_3 = R_3 + R_{вн}$; U_0 - напряжение заряда конденсаторной батареи.

Электродинамическую силу взаимодействия F определим как производную электромагнитной энергии W рассматриваемых контуров по направлению x , т.е.

$$F(t) = dW/dx. \quad (6)$$

Электромагнитная энергия двух контуров, по которым проходят токи $i_1(t)$ и $i_2(t)$, равна

$$W = L_1 \frac{i_1^2}{2} + L_2 \frac{i_2^2}{2} \pm M i_1 i_2. \quad (7)$$

Представляя электродинамический излучатель как один контур с эквивалентной индуктивностью $L_3(x)$, определим силу взаимодействия:

$$F(t) = \frac{1}{2} \frac{U_0^2}{\omega_{ce}^2 L_3^2} e^{-2\delta t} \sin^2 \omega_{ce} t \cdot \frac{dL_3}{dx}. \quad (8)$$

Учитывая то, что энергия W_H , запасенная в конденсаторе C_3 , определяется из соотношения

$$W_H = U_0^2 C_3 / 2, \quad (9)$$

преобразуем соотношение (8) к следующему виду:

$$F(t) = \frac{W_H}{L_3} \left(\frac{\omega_0}{\omega_{ce}} \right)^2 e^{-2\delta t} \sin^2 \omega_{ce} t \cdot \frac{dL_3}{dx}. \quad (10)$$

Величину перемещения x определим как результат взаимного перемещения двух масс (катушки m_1 и штампа m_2). Эти массы действуют на грунт с силой $P = (m_1 + m_2)g$, равной силе тяжести. Уравнение движения массы m_1 имеет вид:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = m_1 g - F(t). \quad (11)$$

Уравнение движения массы m_2 :

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = m_2 g + F(t) - S(x_2), \quad (12)$$

где $S(x_2)$ - определяется динамической реакцией грунта на перемещение штампа.

Если принять во внимание то обстоятельство, что возбуждение колебаний штампом происходит в упругом полупространстве с потерями, то функция динамической реакции будет иметь вид:

$$S(x_2) = -h_2 \frac{dx_2}{dt} - k_{cp} x_2, \quad (13)$$

где h_2 - коэффициент демпфирования колебаний; k_{cp} - коэффициент, учитывающий характеристики грунта.

Учитывая, что

$$|x_{1\max}| \ll |x_{2\max}|, \text{ а } \left. \frac{dx_1}{dt} \right|_{t_1} = \left. \frac{dx_2}{dt} \right|_{t_1},$$

где t_1 - момент времени начала перемещения массы m_1 , определяемый из условия $m_1 g = F(t)$, уравнение движения штампа на упругом полупространстве представим в виде уравнения вынужденных колебаний диссипативной системы с одной степенью свободы:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{h_2}{m_2} \frac{dx}{dt} + \frac{k_{cp}}{m_2} x = \frac{F(t)}{m_2} + g. \quad (14)$$

Для анализа воздействия процессов в разрядной цепи и элемента механической системы целесообразно использовать спектральное представление силового воздействия. Учитывая, что период T силового воздействия определяется интервалом $[0, \pi/\omega_{ce}]$, запи-

шем преобразование Фурье

$$H(\omega) = \frac{2}{\omega_{c\delta}} \int_0^T F(t) e^{-j\omega t} dt \quad (15)$$

или в виде

$$H(\omega) = \frac{2\omega_0^2 W_n}{\omega_{c\delta}^3 L_3} \frac{dL_3}{dx} \int_0^T e^{-2\delta t} \cdot \sin^2 \omega_{c\delta} t e^{-j\omega t} dt. \quad (16)$$

Используя (16), получим соотношения для амплитудного $G_F(\omega)$ и фазового $\varphi_F(\omega)$ спектров силы:

$$G_F(\omega) = A \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{\omega_0^2}{\omega_{c\delta}^3} \frac{e^{2na'} - 2e^{na'} \cdot \cos na'' + 1}{\mu_1^2 + \eta_1^2}}; \quad (17)$$

$$\varphi_F(\omega) = \arctg \frac{e^{2na'} \sin na''}{e^{2na'} \cos na'' - 1} - \arctg \frac{\eta_1}{\mu_1},$$

где $A = \frac{W_n dL_3}{L_3 dx}$; $a' = \frac{2\delta}{\omega}$; $a'' = -\omega/\omega'$;

$$\mu_1 = a'(4 + a'^2 - 3a''^2); \quad \eta_1 = a''(4 - a''^2 + 3a'^2) \cdot (A).$$

Соотношения (5, 10, 14, 17) позволяют установить влияние различных факторов на работу электродинамического излучателя. Так, увеличение R_3 приводит к увеличению тепловых потерь и снижению той части запасенной в конденсаторе энергии, которая расходуется на механическую работу. Вместе с тем, увеличение R_3 при неизменных значениях L_3 и C_3 , а значит и неизменном значении ω_0 приводит к смещению максимума силового импульса к его переднему фронту. Величина $G_F(\omega)$ при фиксированной частоте и при $\delta = \text{const}$ будет увеличиваться с увеличением ω_0 . Управление генератором ω_0 можно осуществлять путем изменения скорости разряда конденсаторной батареи или изменением схемы включения индукторов. Изменение эквивалентной индуктивности разрядной цепи достигается переходом от последовательного к параллельному или смешанному соединению катушек, либо применением группы преобразователей, рассредоточенных по поверхности грунта.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены вопросы возбуждения сейсмоакустических сигналов с поверхности земли плоскими электродинамическими излучателями. Получены аналитические выражения, устанавливающие связь между формой и амплитудой силового импульса и его спектром от величины накопленной в конденсаторе энергии и параметров разрядного контура при условии, что исследуемая геологическая среда представлена в виде упругого полупространства.

2. Полученные соотношения позволяют определить основные электрические и геометрические параметры электродинамического преобразователя и провести его оптимизацию для необходимого спектра излучаемых частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загривный Э.А., Козярук А.Е., Малярев В.И., Мельникова Е.Е. Перспективы использования забойных электротермических комплексов для повышения нефтеотдачи пластов с тяжелой высоковязкой нефтью // *Электротехника*. - 2010. - № 1.
2. Колосов В.М. Применение приповерхностных источников возбуждения при остронаправленном излучении сейсмической энергии в нижнее полупространство. Использование приповерхностных источников в сейсморазведке: Тематич. сб. - Саратов, 1987. - С. 32-38.

3. Потапов О.А., Организация и технические средства сейсморазведочных работ. - М.: Недра, 1989. - 260 с.
4. Гурин А.Г. Определение механических напряжений под мембраной электродинамического излучателя сейсмических колебаний // *Механика та машинобудування*. Наук.-техн. журнал АН ВШ України. - 1998. - № 2. - С. 69-72.
5. Мостовой С.П., Бяков Ю.А., Гурин А.Г. О выборе элементов электродинамических фазированных антенных решеток // *Труды НТК "Комплексные геолого-геофизические исследования мирового океана"*. - 1988. - С. 67-68.
6. Дубов Н.Н., Заславский Ю.М., Мостовой С.П. Короткозамкнутый сейсмический геолокатор на объемных Р-волнах // *Изв. РАН Физика Земли*. - 1992. - № 11. - С. 54-63.
7. Кауфман В.И. Аппаратурное обеспечение контроля и управления работой импульсных невзрывных источников / *Совершенствование техники и методики геофизических исследований*. Сб. науч. тр. - Львов: УкрНИГРИ, 1986. - С. 50-57.
8. Щерба А.А., Дубовенко К.В. Высоковольтные электроразрядные компактные системы. - К.: Наукова думка, 2008. - 360 с.
9. Гурин А.Г. Создание комплекса высокоэффективных электродинамических устройств для контроля параметров окружающей среды. Теоретические основы разработки и внедрение: Дис. д-ра техн. наук. - Харьков, 1999. - 391 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zagrivnyj `E.A., Kozyaruk A.E., Malyarev V.I., Mel'nikova E.E. Perspektivy ispol'zovaniya zabojnyh `elektrotermicheskikh kompleksov dlya povysheniya nefteotdachi plastov s tyazhelej vysokovязкой нефтью // *Elektrotehnika*. - 2010. - № 1. 2. Kolosov V.M. Primenenie pripoverhnostnyh istochnikov vzbuzhdeniya pri ostronapravlennom izluchenii sejsmicheskoy `energii v nizhnee poluprostranstvo. Ispol'zovanie pripoverhnostnyh istochnikov v sejsmorazvedke: Tematich. sb. - Saratov, 1987. - S. 32-38. 3. Potapov O.A., Organizaciya i tehnichekije sredstva sejsmorazvedochnyh rabot. - M.: Nedra, 1989. - 260 s. 4. Gurin A.G. Opredelenie mehanicheskikh napryazhenij pod membranoj `elektrodinamicheskogo izluchatelya sejsmicheskikh kolebanij // *Mehanika ta mashinobuduвання*. Nauk.-tehn. zhurnal AN VSh Ukraini. - 1998. - № 2. - S. 69-72. 5. Mostovoj S.P., Byakov Yu.A., Gurin A.G. O vybore `elementov `elektrodinamicheskikh fazirovannyh antennyh reshetok // *Trudy NTK "Kompleksnyje geologo-geofizicheskie issledovaniya mirovogo okeana"*. - 1988. - S. 67-68. 6. Dubov N.N., Zaslavskij Yu.M., Mostovoj S.P. Korotkozamknutyj sejsmicheskij geolokator na ob`emnyh P-volnah // *Izv. RAN Fizika Zemli*. - 1992. - № 11. - S. 54-63. 7. Kaufman V.I. Apparaturnoe obespechenie kontrolya i upravleniya rabotoj impul'snyh nevzryvnyh istochnikov / *Sovershenstvovanie tehniki i metodiki geofizicheskikh issledovanij*. Sb. nauch. tr. - L'vov: UkrNIGRI, 1986. - S. 50-57. 8. Scherba A.A., Dubovenko K.V. Vysokovol'tnyje `elektrozaryadnye kompaktnye sistemy. - K.: Naukova dumka, 2008. - 360 s. 9. Gurin A.G. Sozdanie kompleksa vysoko`effektivnyh `elektrodinamicheskikh ustrojstv dlya kontrolya parametrov okruzhayushej sredy. Teoreticheskie osnovy razrabotki i vnedrenie: Dis. d-ra tehn. nauk. - Har'kov, 1999. - 391 s.

Поступила 11.02.2011

Гурин Анатолий Григорьевич, д.т.н., проф.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 707-66-63, e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua

Кононов Борис Тимофеевич, д.т.н., проф.
Щека Владимир Николаевич, к.т.н., с.н.с.
Харьковский университет воздушных сил
61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79
тел. (057) 772-61-83

Gurin A.G., Kononov B.T., Scheka V.N.

Features of seismoacoustic signal generation by ground-based pulsed sources with planar electrodynamic radiators.

The paper presents formulas describing relationship between parameters of capacitor bank discharge circuit that forms a current impulse and influence of investigated medium on the shape and spectrum distribution of a strike impulse formed by electrodynamic planar radiators.

Key words – capacitor bank, discharge circuit parameters, seismoacoustic signal generation, electrodynamic planar radiators.