

УДК 550.834(075)

Возбуждение сейсмических волн импульсными невзрывными источниками

Владимир А. Детков*

СНИИГГИМС,

Красный 67, Новосибирск, 630091

Россия

Получена 18.05.2009, окончательный вариант 20.06.2009, принята к печати 30.06.2009

Рассматриваются физические основы возбуждения сейсмических волн в сейсморазведке с использованием импульсных невзрывных источников на основе короткоходовых электромагнитов.

Ключевые слова: возбуждение, сейсмические волны, импульсный невзрывной источник.

Разработанная и примененная при создании серии сейсмоисточников "Енисей" конструктивная схема с использованием электромагнитного привода позволила наилучшим, по сравнению с известными техническими решениями, образом удовлетворить совокупность предъявляемых к сейсмоисточнику требований [1-6]. Это достигнуто за счет простого конструктивного решения сейсмоисточника, высокого коэффициента преобразования потребляемой сейсмоисточником энергии в механическую, реализации более согласованного с акустической нагрузкой режима механического воздействия на излучающую плиту и обеспечения возможности групповой работы сейсмоисточников.

На рис. 1а приведена упрощенная конструктивная схема сейсмоисточников "Енисей" и характер изменения скорости и перемещения плиты (v_n, x_n) , якоря (v_y, x_y) электромагнита и инерционной массы-пригруза (v_n, x_n) при работе сейсмоисточника. При пропускании тока по обмотке возбуждения 5 от импульсной схемы силового питания (особенности работы системы питания будут рассмотрены ниже) через зазор δ_0 между магнитопроводом 6 якоря и полюсами магнитопровода 4 индуктора-пригруза электромагнита проходит магнитный поток Φ , и между якорем и индуктором создается сила $P(t)$, которую можно принять постоянной по величине.

В исходном положении, до подачи импульса тока на индуктор 4, поверхность грунта 10 прижата опорной плитой 1, стойками 2 и пригрузом 3. При подаче импульса тока на обмотку индуктора 4 последний начинает движение вверх по координате z , освобождая опорную плиту 1 от веса пригруза 3. Сила притяжения индуктора через якорь 6, раму якоря 8, стойки 2 и демпферы 9 передается на края опорной плиты 1. В результате поверхность грунта под опорной плитой принимает волновую форму 11, а приложенный к индуктору импульс силы сглаживается элементами конструкции генератора, в частности демпферами 9. В этом случае деформация грунта всегда отстает по времени на величину $(\tau - \tau_r)$ от фронта нарастания силового воздействия индуктора и связь силы давления на грунт σ с его деформацией подчиняется закону Гука:

$$\sigma = E \varepsilon, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга, ε — деформация грунта.

*e-mail: v-detkov@yandex.ru

© Siberian Federal University. All rights reserved

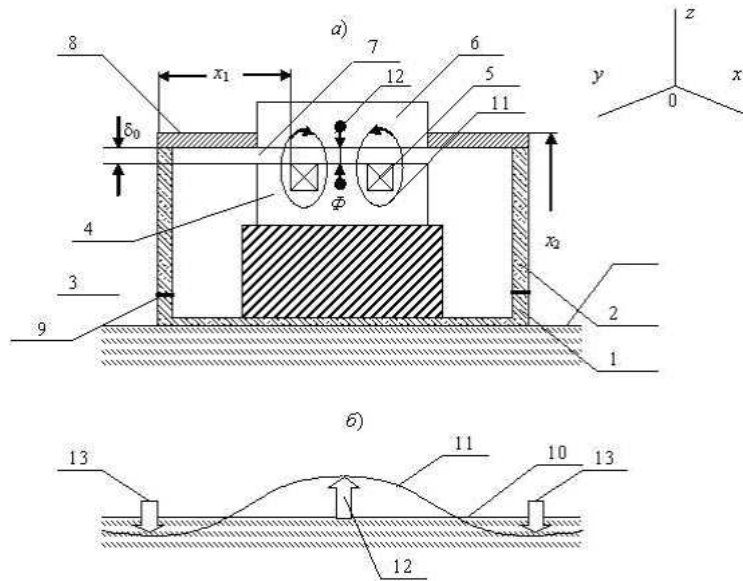


Рис. 1. Конструктивная схема импульсного невзрывного источника "Енисей" и эпюра действующих сил

Если зазор между якорем и корпусом равен δ_0 , то время прохождения индуктором зазора равно $\tau_{я} = \frac{\delta_0}{v_{я}}$, где $v_{я}$ — скорость движения индуктора.

Время распространения механического воздействия по консолям пригруза и стойкам до грунта

$$\tau_{м} = \frac{x_1 + x_2}{v_{м}}. \quad (2)$$

Суммарное время действия импульса на грунт

$$\tau = \tau_{я} + \tau_{м}. \quad (3)$$

Постоянная времени смещения грунта

$$\tau_{г} = \frac{\delta_0}{v_{г}}, \quad (4)$$

где $v_{г}$ — скорость смещения грунта.

Условие пластической деформации грунта при действии силового импульса:

$$\tau > \tau_{г}.$$

Если скорость деформации грунта $v_{г} = 1\text{ м/с}$, а зазор электромагнита $\delta_0 = 5\text{ мм}$, то $\tau_{г} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1} = 5 \cdot 10^{-3}\text{ с} = 5\text{ мс}$.

Пусть время пролета якорем зазора δ_0 равно длительности импульса тока, поступающего на индуктор от генератора:

$$\tau_{я} = 5\text{ мс}; \quad \delta_0 = 5 \cdot 10^{-3}\text{ м},$$

тогда скорость движения якоря

$$v_{\text{я}} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 1 \text{ м/с.}$$

Время запаздывания акустической волны в консолях пригруза и стойках, например для случая $x_1 + x_2 = 2 \text{ м}$:

$$v_{\text{м}} = 4000 \text{ м/с}; \quad \tau_{\text{р}} = \frac{2}{4000} = 0,5 \text{ мс.}$$

Общее время запаздывания действия импульса силы на грунт с учетом запаздывания в раме якоря $\tau_{\text{я}} + \tau_{\text{р}}$, демпфирования пригруза и стоек $\tau_{\text{д}}$: $\tau = \tau_{\text{я}} + \tau_{\text{р}} + \tau_{\text{д}} + 0,5 = 5,5 \text{ мс} + \tau_{\text{д}}$.

Таким образом, в описываемой конструкции за счет введения демпферов всегда можно соблюсти условие:

$$\tau \geq \tau_{\text{Г}},$$

что и является основным отличительным признаком источников "Енисей" по отношению к системам с падающим грузом, для которых $\tau < \tau_{\text{Г}}$, ибо при ударе падающего или толкаемого груза на грунт скорость удара всегда выше скорости смещения грунта.

На рис. 2 изображены зависимости действующих сил от времени, где I — импульс тока в обмотке электромагнита; $\varepsilon(t)$ — изменение деформации грунта; $P_{\text{м}}(t)$ — силовое воздействие на грунт.

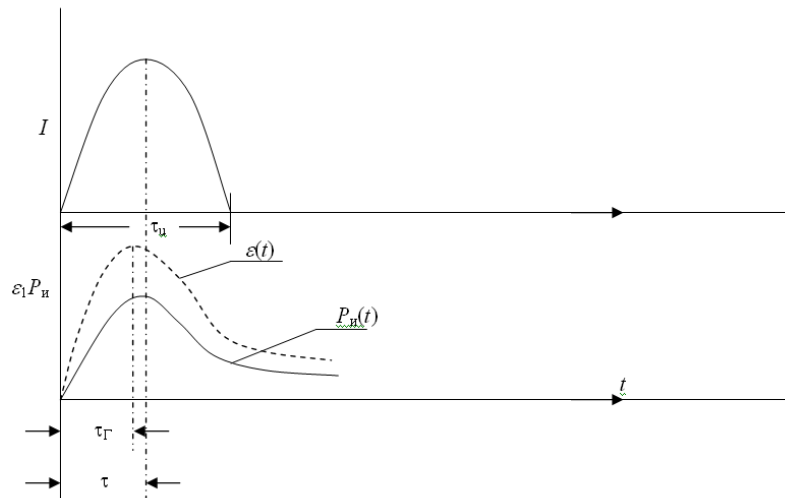


Рис. 2. Временные эпюры действующих сил

В состав электромагнитного привода (рис. 3), обеспечивающего создание на плиту силы $P(t)$, входит короткоходовой электромагнит, схема возбуждения его магнитного поля, содержащая емкостной накопитель энергии C , силовые полупроводниковые приборы VS и VD и зарядное устройство $ЗУ$ для заряда емкостного накопителя от автономного источника питания ИП.

Зарядное устройство должно обеспечивать эффективный заряд емкостного накопителя с необходимым уровнем стабилизации напряжения.

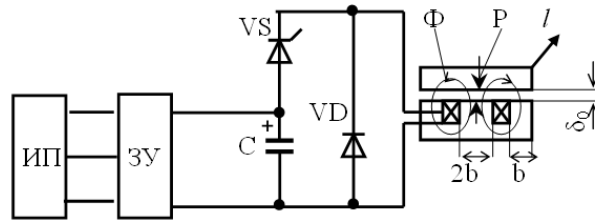


Рис. 3. Электромагнитный привод

Разработанный для применения в сейсмоисточнике электромагнит выполнен с ш-образным магнитопроводом, набранным из листов низкоуглеродистой электротехнической стали с высоким уровнем индукции насыщения B_s . Плоская конфигурация зазора электромагнита обеспечивает создание в нем однородного магнитного поля и наибольшего значения силы с высоким коэффициентом преобразования накопленной в объеме зазора магнитной энергии в механическую.

Развиваемая сила P определяется формулой Максвелла

$$P(t) = \frac{B(t)^2 S}{2\mu_0}, \quad (5)$$

где $B(t)$ — индукция в зазоре электромагнита, μ_0 — магнитная постоянная воздуха, S — площадь зазора между якорем и полюсами индуктора, через которую замыкается магнитный поток.

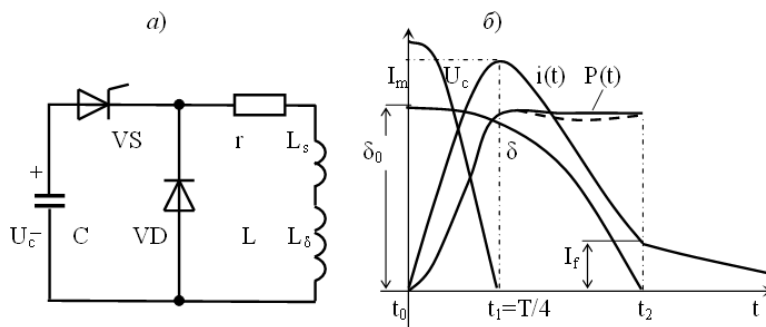


Рис. 4. Характер изменения тока: а) силовая часть электрической схемы питания; б) характер изменения тока $i(t)$ возбуждения, усилия $P(t)$ и изменения зазора $\delta(t)$ электромагнита

Рис. 4 поясняет характер изменения тока $i(t)$ в обмотке возбуждения электромагнита, создаваемой силы и изменения зазора δ . При открывании в момент t_0 по сигналу с сейсмостанции тиристора VS заряженный емкостной накопитель C к моменту t_1 разряжается на обмотку электромагнита. За время разряда ток увеличивается примерно по синусоидальному закону с угловой частотой ω , определяемой емкостью C и индуктивностью обмотки

$$P(t) = \frac{B_{(t)}^2 S}{2\mu_0}, \quad (6)$$

где $S_{\Pi} = bl = S/2$ — площадь центрального полюса ш-образного электромагнита, через который проходит магнитный поток, δ_0 — начальное значение зазора, а x — его уменьшение при выборе зазора под действием силы P . К моменту t_1 , соответствующему четверти периода угловой частоты, напряжение емкости накопителя C уменьшается до нуля, а энергия накопителя C передается в магнитное поле электромагнита и запасается в объемах его магнитопровода и зазора. В момент t_1 разряда емкости напряжение на диоде VD изменяет знак и он автоматически открывается, что приводит к выключению тиристора VS и закорачиванию обмотки с током через диод VD . Время $t_0 - t_1$ характеризует длительность фронта нарастания тока $i(t)$ и силы $P(t) \equiv i^2(t)$. Исследования показывают, что за время $t_0 - t_1$ фронта нарастания тока и силы уменьшение зазора δ_0 незначительно, а плита под действием силы $P(t)$ только начинает ускоряться и деформировать грунт. Основное преобразование магнитной энергии в механическую имеет место на интервале $t_1 - t_2$, на котором происходит выбор зазора δ_0 . Из экспериментальных исследований вытекает, что при близких к номинальным режимам работы сейсмоисточника потокосцепление обмотки электромагнита в течение времени $t_1 - t_2$ выбора основной части зазора изменяется незначительно, не более чем на 5-10 %, что обеспечивает примерное постоянство развиваемой электромагнитом силы при работе сейсмоисточника как на жестком, так и на мягком грунтах. Объясняется это следующим. При закороченной через диод обмотке уравнение электрического равновесия Кирхгофа для нее

$$0 = U_r + U_s + \frac{d\Psi_{\delta}}{dt} = ir + L_s \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi_{\delta}}{dt}, \quad (7)$$

где r — сопротивление обмотки, L_s — индуктивность поля рассеяния обмотки, определяющаяся потоками в пазовой и лобовой частях обмотки, а Ψ_{δ} — потокосцепление, характеризующее магнитный поток, проходящий через зазор δ_0 . Из (7)

$$\frac{d\Psi_{\delta}}{dt} = -ir + L_s \frac{di}{dt}, \quad (8)$$

то есть скорость изменения потокосцепления определяется суммой мгновенных значений падений напряжений U_r и U_s . Поскольку при выборе зазора ток возбуждения уменьшается, то знак U_r противоположен знаку U_s . В начале выбора зазора $|U_r| > |U_s|$, в конце обычно меньше, что приводит к некоторой, на уровне (5–10) %, вогнутости изменения Ψ_{δ} и силы $P(t)$ в процессе выбора зазора. На рис. 4 характер изменения силы $P(t)$ с учетом вогнутости показан пунктиром. Принятие силы, постоянной в течение выбора зазора, позволяет существенно упростить рассмотрение основных особенностей динамики работы электромагнитного привода и сейсмоисточника.

Таким образом, к моменту t_2 выбора зазора при режиме энергопреобразования $\Psi = \text{const}$ ток в обмотке уменьшается, при этом энергия магнитного поля преобразуется в механическую, часть которой в соответствии с принципом работы привода сейсмоисточника передается в движение пригруза, а часть расходуется на движение плиты и деформацию грунта. При этом время $t_{\text{н}}$ выбора зазора и распределение механической энергии привода между этими частями зависит от характера нагрузки (жесткая, мягкая, средняя), то есть от степени согласования работы сейсмоисточника с грунтом. В табл. 1 приведены основные технические характеристики изготавливаемых в ОАО "Енисейгеофизика" санных вариантов

сейсмоисточников, силовые параметры и конструктивные особенности которых определяются количеством применяемых электромагнитов с номинальным значением создаваемого усилия $25 - 10^4 H$.

Таблица 1

№	Наименование показателя	СЭМ-20	СЭМ-50	СЭМ-100
1	Максимальное значение силы, прикладываемой к плите-излучателю, Н	$20 - 10^4$	$50 - 10^4$	$100 - 10^4$
2	Количество электромагнитов, шт.	1	2	4
3	Длительность приложения силы к плите-излучателю, с	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$
4	Активная масса излучателя, кг	490	710	1040
5	Реактивная масса излучателя, кг	800	1270	2280
6	Вес сейсмоисточника (без транспортного средства), кг	1600	4600	6640
7	Напряжение заряда емкостного накопителя, В	850	850	850

В последних разработках санных сейсмоисточников (СЭМ-150 и СЭМ-180) применены электромагниты с большим значением силы. На автомобильной транспортной базе разработаны сейсмоисточники КЭМ-4 и КЭМ-2-130, развивающие силу на излучающие плиты до $100 - 10^4 H$ и $130 - 10^4 H$. Для проведения сейморазведочных работ на акваториях разработан водный вариант сейсмоисточника "Енисей ВЭМ-100К", выполненный в виде катамарана, на поплавок которого действует сила $100 - 10^4 H$, создаваемая четырьмя электромагнитами (аналог наземного сейсмоисточника "Енисей СЭМ-100"). Сегодня уже заключены ряд соглашений с зарубежными странами (США, Франция, Иран, Индия) на поставку этих источников.

Выводы

Заложенный в основу конструкции импульсных невзрывных источников сейсмических волн обратного принципа действия механической массы пригруза относительно поверхности среды за счет отставания во времени силы действия на грунт относительно динамических сил разрушения постилающей поверхности позволил реализовать принципиально новую, не разрушающую грунт технологию сейморазведки, реализуемую как в наземном, так и в водном вариантах. При этом система, обеспечивая высокоточную управляемость по времени производства удара, обладает высокой информационной и технико-экономической эффективностью, вызывающей заинтересованность зарубежных геофизических фирм в поставке подобного оборудования.

Список литературы

- [1] В.В.Ивашин, Влияние форсировки магнитного поля короткоходового электромагнита на его быстродействие и КПД преобразования энергии, *Электромеханика*, (1986), №2, 103-108.

- [2] В.П.Смирнов, Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда "Енисей СЭМ, КЭМ", *Приборы и системы разведочной геофизики*, Саратов, (2003), №1, 21-25.
- [3] В.А.Детков, В.В.Ивашин, В.П.Певчев, Патент 2171478 РФ, МКИ 7G01V 1/09. Импульсный невзрывной сейсмоисточник с электромагнитным приводом; приоритет 23.02.00; опубл. 27.07.01, Бюл. №21.
- [4] В.А.Детков, Импульсные электромагнитные сейсмоисточники "Енисей". Обзор моделей и опыт практического применения, *Приборы и системы разведочной геофизики*, Саратов, (2007), №4, 5, 5-10.
- [5] В.А.Детков, Г.Я.Шайдуров, О возможности адаптивного управления импульсными невзрывными источниками, *Приборы и системы разведочной геофизики*, Саратовское отд. Евро-Азиатского геофизического общества (СО ЕАГО), Саратов, (2007), №4, 14-16.
- [6] В.А.Детков, Г.Я.Шайдуров, Частотно-импульсный режим возбуждения сейсмических волн группой импульсных невзрывных источников, *Приборы и системы разведочной геофизики*, СО ЕАГО, Саратов, (2007), №4, 11-13.

Stimulation of Seismic Waves by Puised Nonexplosive Source

Vladimir A.Detkov

The physical foundations of seismic waves stimulation in seismic exploration with the help of puised nonexplosive sources on the base of short-run electromagnets are examined.

Keywords: stimulation, seismic waves, puised nonexplosive source.