

Аппаратно-программный комплекс VIBROPS для малоглубинных исследований на основе электромеханического вибрационного источника

■ Серебряков В.С., Жуков А.П., Соловьев А. О., ИИИТ РУДН

Введение

Технология вибрационной сейсморазведки в настоящее время широко применяется при поисках и разведке нефтегазовых месторождений. Работы, проводимые с вибрационным источником в нефтяной сейсморазведке, очень распространены и выполняются с середины прошлого века [10]. В отрасли используется широкий спектр различной аппаратуры от множества производителей. Сконструированы и разработаны разные типы вибрационных источников. Хорошо проработана теория вибрационной сейсморазведки [2]. Разработаны методы возбуждения вибрационных сигналов, расширенных как в область низких, так и высоких частот. Внедряются технологии возбуждения и обработки широкополосного сигнала, что в значительной степени повышает качество и информативность данных, и позволяет вибрационной сейсморазведке не только выйти на уровень взрывной, но и превзойти его по детальности и глубинности [5].

Но помимо задач поиска нефти и газа сейсморазведка применяется при малоглубинных исследованиях (при инженерно-геологических исследованиях, при поиске и разведки полезных ископаемых на небольших глубинах и при других задачах, требующих изучения верхней части разреза - ВЧР). В качестве основного источника при данных исследованиях до настоящего времени применяется кувалда (падающий груз).

Однако после появления электромеханических вибрационных источников на базе линейного электродвигателя появи-

лась возможность создать технологию изучения ВЧР, позволяющую проводить более детальное и более глубинное исследование. В статье [6] хорошо описан прототип подобного вибрационного источника. Он показал хорошие результаты. Благодаря линейному электродвигателю вибрационный источник стал проще в обслуживании и в применении. На основе данного прототипа голландская компания «Seismic mechatronics» организовала серийное производство вибрационных источников с приводом от линейного электродвигателя. Были разработаны вибрационные источники с различной массой, что дало возможность применения таких вибрационных источников также и в большой сейсморазведке.

В данной статье описывается аппаратно-программный комплекс VIBROPS, созданный на базе вышеупомянутого источника, регистрирующей системы, трёхкомпонентных геофонов и мобильной платформы, а также даны некоторые результаты его применения.

Вибрационный источник с приводом от линейного электродвигателя

В сейсморазведке, нацеленной на поиск месторождений нефти и газа, как правило используются виброисточники на основе электрогидравлического привода, имеющие определённые ограничения при возбуждении высокочастотных сигналов. Внутренняя нелинейность гидравлической системы является одной из причин дополнительных гармоник, обычно наблюдаемых с вибраторами [3,7,8].

Другая возможность управлять вибратором, которая не имеет внутренних ограничений гидравлической системы, заключается в использовании линейного синхронного электродвигателя. Эти электродвигатели способны создавать линейные силы и могут быть применены во многих приложениях. Они, например, используются на заводах для быстрого и точного перемещения объектов, а также в качестве привода поездов на магнитной подушке. Использовать линейный синхронный электродвигатель в конструкции сейсмического вибратора было предложено в работах [4,8].

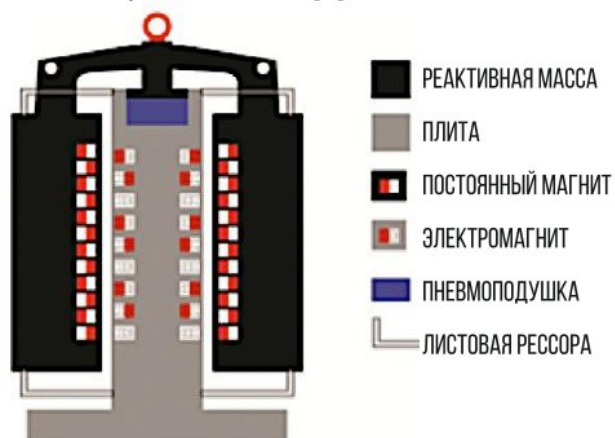
Преимущество такого вибратора перед гидравлическим вибратором заключается в снятии ограничений, накладываемых гидравлической системой, что дает возможность возбуждать свип-сигналы различной формы и широко частотного диапазона [3,5,11]

В работе [6] хорошо описано строение прототипа вибрационного источника, построенного на базе линейного синхронного электродвигателя (Рис. 1).

Реактивная масса удерживается с помощью пневматической подушки и листовых рессор.

Пневматическая подушка поддерживает реактивную массу, тем самым

▼ Рис. 1. Схема строения вибрационного источника с приводом от линейного электродвигателя [6].



значительно уменьшая требуемую общую управляемую силу. Листовые пружины направляют реактивную массу в вертикальном направлении, ограничивая отклонение ее от вертикали до 10. Листовая пружина обеспечивает экономичный способ управления массой без добавления трения.

Имеющийся в нашем распоряжении вибрационный источник «Lighting» производства компании «Seismic Mechatronics» также создан на основе линейного электродвигателя и предназначен для проведения малоглубинных сейсмических работ для исследования ВЧР и инженерных изысканий. Данный виброисточник может устанавливаться на различные мобильные шасси (Рис. 2).

▼ Рис. 2. Вибрационный источник смонтированный на грузовой фургон «Ford Transit» (вверху) и на снегоболотоход «Лесник Профи» (внизу).



▼ Табл. 1. Основные технические характеристики вибрационного источника «Lighting».

Вес виброисточника	90 кг
Реактивная масса	50 кг
Максимальная сила воздействия	
В режиме возбуждения продольных волн Р	1200Н (270lbs)
В режиме возбуждения поперечных волн S	1700Н (400lbs)
Диапазон частот	1 – 1000 Гц
Диапазон частот работы источника с максимальной силой	8 – 400 Гц
Источник питания	Аккумулятор 48В

Технические характеристики вибрационного источника «Lighting» представлены в таблице 1.

При установке на снегоболотоход «Лесник Профи» производства ООО «Лесник» (г. Вологда) или подобные ему внедорожные транспортные средства имеется возможность проводить полевые работы на бездорожье и в сложных природно-климатических условиях.

Возбуждение сигнала возможно, как для продольных волн, так и для поперечных волн. Для поперечных волн источник

располагается горизонтально, а для продольных волн вертикально (Рис. 3).

Управление источником осуществляется с помощью программы установленной на компьютере. Задаются следующие параметры для свип-сигнала: тип сигнала (линейный или различные виды нелинейного), длительность сигнала, сила воздействия, начальные и конечные частоты, параметры начального и конечного конусования, параметры отработки мультисви́па (для накоплений) и альтерацию фазы (инверсный свип). Также

▼ Рис. 3. Слева - положение вибрационного узла для возбуждения поперечных волн, справа - для возбуждения продольных волн.



можно загрузить свой пользовательский свип-сигнал.

Сигналы, получаемые с плиты, с реактивной массы и пилот-сигнал, записываются на компьютере, а также их можно получить, подключив записывающую аппаратуру к управляющему блоку.

Регистрирующая аппаратура

При формировании аппаратно-программного комплекса был сделан выбор в пользу нодальных (бескабельных) систем регистрации, позволяющих записывать длительный сигнал до 40 секунд и более с малым шагом дискретизации. Одной из таких отечественных разработок является телеметрическая



▲ Рис. 4. Трехканальный беспроводной автономный регистратор "SCOUT".

система SCOUT, разработанная специальным конструкторским бюро сейсмического приборостроения «СКБ СП» г. Саратов [12]. Характеристики системы приведены в Таблице 2.

▼ Табл. 2. Технические данные трехканального беспроводного автономного регистратора.

Число каналов	3
Максимальный входной сигнал, В	± 2.5
Коэффициент нелинейных искажений, %	0,00035
Уровень собственных шумов в полосе частот от 10 до 125 Гц, мкВ эфф., не более	0,12
Напряжение смещения нуля при максимальном усилении, мкВ, не более	± 1
Цена младшего разряда выходного кода при минимальном коэффициенте усиления, нВ	305.56 ± 0.9
Коэффициент подавления синфазного сигнала, дБ, не менее	100
Коэффициент взаимных влияний между каналами, дБ, не более	минус 120
Фиксированный коэффициент усиления	1, 4, 16, 64
Входное сопротивление канала, кОм	19.95 ± 0.20
Входная емкость канала, нФ	52 ± 2.6
Усиление на канал, дБ	0..36
Шаг дискретизации, мс	8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25
Синхронизация по времени с базовой станцией	GPS
Максимальная длительность регистрации в автономном режиме, обеспечиваемая внутренней памятью 8Гб при периоде дискретизации 2 мс, час, не менее	500
Максимальная длительность регистрации в автономном режиме, обеспечиваемая внутренней батареей напряжением 7.4В, емкостью 10А/ч, час, не менее	240
Диапазон рабочих температур, °С	минус 40 ... 70
Диапазон температур блока при заряде, °С	0 ... 45
Габаритные размеры, мм	158 Ч 157 Ч 119

▼ Табл. 3. Основные технические характеристики геофона GS-20DX. (Параметры замерены при температуре 25°C и углах наклона от 0° до 20°).

Собственная частота (Fn)	10 Гц ± 5 %
Верхний предел частоты пропускания	>250 Гц
Сопротивление катушки (Rc)	395 Ом ± 5%
Гармоническое искажение на частоте 12 Гц	
Чувствительность (G)	27,5 В/м/с
Чувствительность при 70% затухании	19,7 В/м/с ± 10%
Степень затухания	
(в открытой цепи)	0,3
(с шунтом 1,47 кОм)	0,6 ± 10 %
(с шунтом 1 кОм)	0,7 ± 10 %
Постоянная затухания (Rt*Bc*Fn)	550
Масса подвижной части	11,0 г ± 10 %
Рабочий диапазон температур	-34...+71°C
Габаритные размеры:	
диаметр	25,4 мм
высота	33 мм
масса	86 г

Так как аппаратура является бескабельной, то имеется возможность проводить исследования с различными системами наблюдений. Удобно с телеметрической системой проводить площадные работы как по регулярной так и по нерегулярной системе наблюдения. Нерегулярная система наблюдения удобна в городских пространствах и на сильно пересеченной местности. Отсутствие косы, соединяющий приемники, дает возможность сделать шаг между пунктами приема неравномерным.

Имеющаяся модель блоков является трехканальной, что позволяет использовать их при многоволновых исследованиях. К блокам при работах подключались трехкомпонентные (X, Y, Z) сейсмоприем-

ники в пластмассовом корпусе GS-3C с геофонами GS-20DX, GS-20DX-2B.

Характеристики геофонов представлены в Таблице 3 и Таблице 4.

В процессе создания комплекса была решена проблема синхронизации виброисточника и базовой станции регистрирующей системы. Сигналы с вибрационного источника (управляющий сигнал, сигнал с плиты и сигнал с реактивной массы) записывались на один из телеметрических модулей и на компьютер, управляющий вибрационным источником. Записанный файл на компьютере помимо сигналов имел ещё и другую информацию такую, как силу воздействия, длительность конусования и др.

▼ Табл. 4. Основные технические характеристики геофона GS-20DX-2B. (Параметры замерены при температуре 25°C и углах наклона от до $\pm 5^\circ$).

Собственная частота (Fn) (при наклоне 0°)	8 Гц $\pm$ 0.5 Гц
Собственная частота (Fn) (при наклоне $\pm 5^\circ$)	8 Гц $\pm$ 0.8 Гц
Верхний предел частоты пропускания	>200 Гц
Сопротивление катушки (Rc)	395 Ом $\pm$ 5%
Гармоническое искажение	
на частоте 12 Гц (при наклоне 0°)	< 0,2 %
на частоте 12 Гц (при наклоне $\pm 5^\circ$)	< 0,3 %
Чувствительность (G)	27,6 В/м/с $\pm$ 10%
Степень затухания	
(в открытой цепи)	0,38 $\pm$ 10%
Постоянная затухания (Rt*Bc*Fn)	687
Масса подвижной части	11,0 г $\pm$ 5 %
Рабочий диапазон температур	-34...+71°C
Габаритные размеры:	
диаметр	25,4 мм
высота	33 мм
масса	87 г
длина гермовывода	4,06 мм

Опробование комплекса

После всей сборки и настройки аппаратуры и техники нами был проведен опытно-методические работы на территории РУДН. Они были выполнены на дорожке, соединяющей улицу Миклухо-Маклая и медицинский центр (Рис. 5).

Пункты приема (ПП) располагались рядом с дорожкой. Пункты возбуждения

▼ Рис. 5. Район проведения работ.



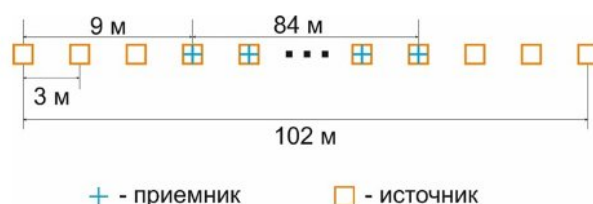
(ПВ) были расположены рядом с линией приема. ПП и ПВ располагались через 3 метра. Длина линии ПВ составила 102 м. Всего ПВ 35, а ПП - 29. Ориентация профиля с юго-запада на северо-восток (Рис. 6).

На каждом ПВ проводилось возбуждение как продольных, так и поперечных волн.

Параметры возбуждения сигнала:

- Тип свип-сигнала – линейный
- Полоса частот от 3 Гц до 200 Гц
- Длина свип-сигнала – 12 с

▼ Рис. 6. Схема проведения.



- Форма конуса – косинусоидальный
- Длина конуса – 0.1 с для поперечных волн и 0.1 с для продольных волн.

Сила воздействия при возбуждении поперечных волн составила 700 Н, а при возбуждении продольных волн составила 400 Н. Число накоплений на пункте возбуждения 4 в каждую сторону.

Параметры регистрации:

- Шаг дискретизации 0.25 мс
- Длина записи 14 с

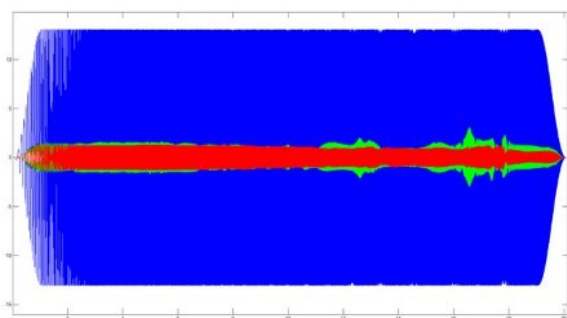
Также на той же расстановке были проведены работы с источником типа падающий груз (кувалда 5 кг). Возбуждение продольных волн осуществилось с помощью удара кувалды по плашке, а поперечных волн ударом по двутавру. Число накоплений 10 при ударах в одну сторону.

Обработка данных

После проведения полевых работ данные с блоков «SCOUT» собираются на компьютере, и далее формируются виброграммы. В файле, сохраненном управляющей программой, содержится информация о генерируемом сигнале, а также сигналы, содержащие ускорение смещения реакционной массы и плиты (Рис. 7).

Обработка производилась по стандартному графу в обрабатывающей системе SeisSpace:

- ▼ Рис. 7. Графики сигналов: управляющий сигнал (синий), ускорение смещения плиты (зеленый), ускорение смещения положения реактивной массы (красный).



1. Присвоение геометрии.
2. Корреляционная обработка по сигналу (только для вибрационного источника).
3. Шумоподавление по сейсмограммам.
4. Деконволюция.
5. Определение скоростного закона.
6. Ввод кинематических поправок.
7. Суммирование.
8. Постстек обработка.
9. Миграция.

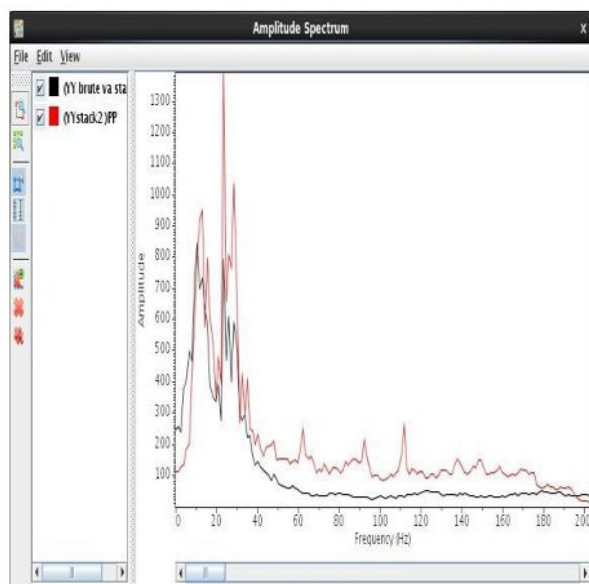
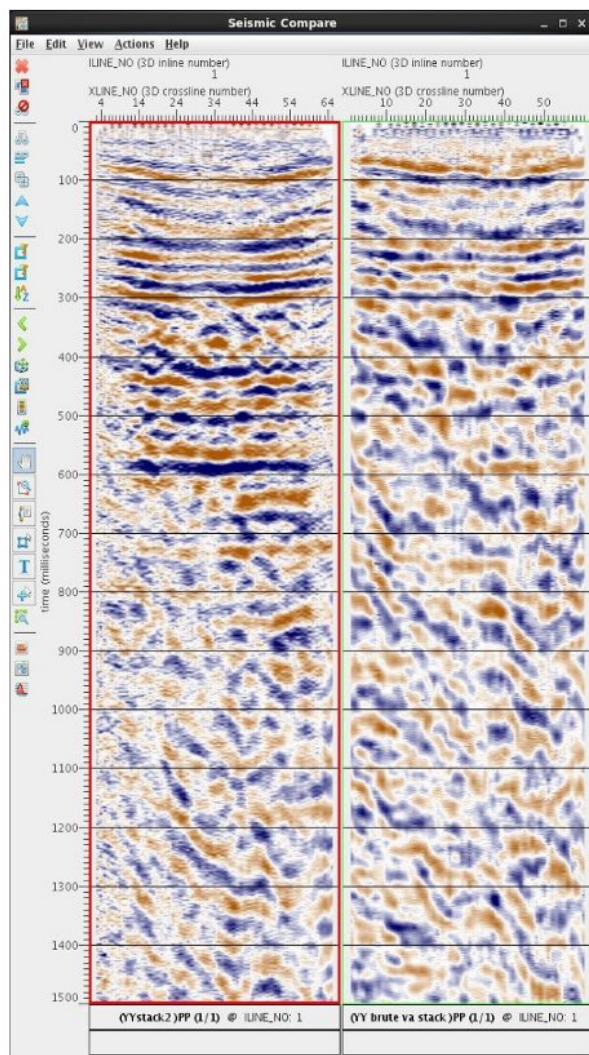
Результаты по продольным волнам получились менее информативными, чем результаты по поперечным волнам, как с вибрационным источником, так и с кувалдой. Связано это с большими значениями скоростей слоев верхней части, что не дает возможности их разделения.

После применения всех процедур, были получены результаты для поперечных волн как для вибрационного источника, так и для кувалды (Рис. 8).

Сравнение двух разрезов демонстрирует большую энергетическую насыщенность сигнала, полученную с вибрационного источника и более уверенное прослеживание горизонтов. Горизонт на времени 550 мс соответствует кровле известняков на глубине порядка 130 метров.

Заключение

В результате опробования аппаратно-программного комплекса VIBROPS продемонстрирована возможность его использования для изучения ВЧР с большей глубиной, чем с традиционным источником типа «падающий груз» (кувалда). Решены технические вопросы синхронизации источника с бескабельной регистрирующей системой SCOUT. Разработана конструкция для крепления вибратора на мобильную платформу с



▲ Рис. 8. Временные разрезы (YY - компонента). Вверху временные разрезы полученные с помощью вибрационного источника.

возможностью оперативного перевода комплекса из транспортного в рабочее положение и наоборот.

Литература:

1. Апродов В.А, Апродова А.А. Движения земной коры и геологическое прошлое Подмосквья-М., Наука, 1963.
2. А.П. Жуков, С.В. Колесов, Г.А. Шехтман, М.Б. Шнеерсон [2011]. Сейсморазведка с вибрационными источниками. Издательство ГЕРС.
3. Dean, T. [2014]. The use pseudorandom sweeps for vibroseis surveys. Geophysical Prospecting, 62, 50-74.
4. Drijkoningen, G., A. Veltman, W. Hendrix, K. Faber, J. Brouwer, and G. Hemstede, 2006, A linear motor as seismic horizontal vibrator: 68th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, P072.
5. Galikeev, T., Zhukov, A. and Korotkov, I. [2019]. High-resolution land seismic acquisition with Broadsweep. First Break, 37, 61-66.
6. Noorlandt, D., Drijkoningen, G., Dams, J. and Jenneskens, R. [2015]. A seismic vertical vibrator driven by linear synchronous motor. Geophysics, 80, EN57-EN67.
7. Sallas, J., 2010, How do hydraulic vibrators work? A look inside the black box: Geophysical Prospecting, 58, 3-18,
8. Unger, R., 2002, A seismic transmission system for continuous monitoring of the lithosphere: A proposition: Ph.D. thesis, Delft University of Technology.
9. Wei Z. and Phillips T. [2010]. Harmonic distortion reduction on seismic vibrators. The Leading Edge, 29, 256-261
10. Wei Z., Phillips T. and Hall M. [2010]. Fundamental discussions on seismic vibra-

tors. Geophysics, vol. 75, no. 6, pp. W13–W25

11. Zhukov, A., Korotkov, I., Sidenko, E., Nekrasov, I., Gridin, P. and Galikeev, T. [2017]. Simultaneous pseudo-random shuffle-sweep generation and increased seismic data acquisition productivity. SEG Technical Program, Expanded Abstracts, 151-155.

<http://skbsp.ru/index.php/ru/sejsmosistema/beskabelnaya-sejsmosistema-scout>

Подробнее об авторах



Жуков
Александр Петрович

Заведующий лабораторией
вибрационной и
многоволновой
сейсморазведки
ИИИТ РУДН,
доктор технических
наук



Серебряков
Владислав Сергеевич

Научный сотрудник
ИИИТ РУДН



Соловьев
Андрей Олегович

Научный сотрудник
ИИИТ РУДН