

Расширение границ применения вибратора: расширение низко- и высоко-частотного диапазона. Pushing the vibrator envelope: extending low and high frequency limits

Zhouhong Wei*

Краткое содержание

На низких частотах энергия, производимая сейсмическим вибратором, ограничивается по ряду некоторых механических и гидравлических причин. Они включают ход реактивной массы, подачу гидронасоса, время отклика насоса, ход сервоклапана, размер аккумулятора, мощность двигателя, пиковая сила отрыва плиты от грунта, гармоническое искажение, и качество изоляции шасси автомобиля. Мы разработали модель, которая может симулировать динамику сейсмовибратора в целях оценки влияния этих параметров на границы фундаментальной силы вибратора на низких частотах. Модельные данные показывают, что ход реактивной массы и пиковая сила отрыва плиты от грунта – ключевые параметры для установки целевой фундаментальной силы, которую можно достичь на низких частотах. Ключевые факторы, ограничивающие производительность вибратора на высоких частотах – узкая полоса частот системы сервоклапана, изгиб и вес базовой плиты и условия контакта базовой плиты и грунта. Мы разработали контроллер высоких частот, который интегрирован в технологию клапанов Pelton DR в целях расширения полосы частот, используемой вибратором до 250 Гц. В отличие от этого, большинство современных сейсмовибраторов, снабженных электроникой контроля за уровнем, могут работать со стабильным выходом на максимальных частотах не более 120 Гц.

Введение

Расширение полосы испускаемого сигнала вибросейсмических источников в сторону низких частот увеличивает вертикальное разрешение сейсмических данных. Низкие частоты важны в инверсии сейсмоподробности и их регистрация может увеличить точность скоростных разрезов, получаемых на поверхности существенным образом (Bell, 1986). Высокие частоты наиболее важны для улучшения пространственной и временной разрешающей способности, в особенности при малоглубинных сейсмических или ВСП съемках. Успешное выделение коллектора зависит от достижения обеих этих характеристик. Вибраторы – наиболее широко используемый источник при наземных сейсмических исследованиях. Возможность управлять полосой частот и выходной энергией вибратора в выбранном частотном диапазоне дает крупное преимущество над другими источниками. Однако, ввиду ограничений, которые накладываются механическими и гидравлическими компонентами, вибратор может поддерживать достаточную амплитуду силы в определенном частотном диапазоне, обычно от 5-80 Гц. Характеристики вибратора на низких частотах ограничиваются физическими ограничениями вибратора, такими как ход реактивной массы от пика до пика и пиковая сила отрыва плиты от грунта. Характеристики вибратора на высоких частотах ограничиваются полосой частот сервоклапана и жесткостью базовой плиты вибратора. Вес базовой плиты и ее контакт с грунтом – другие ограничивающие факторы, которые ухудшают характеристики вибратора на высоких частотах.

Большая часть свипов вибратора имеет начальную частоту 5 Гц или выше с переходной зоной 0.5 с. При работе подобным способом, вибратор работает на максимальном приводе краткий период времени на низких частотах, и можно избежать механических и гидравлических ограничений (Mougenot, 2005). Bagaini (2006) разработал метод свиппования с использованием максимального смещения в целях оптимального использования современных вибраторов для получения на выходе

требуемого усилия на грунт на низких частотах. Jeffreys and Martin (2003) разработали аппарат и метод для получения сложного свипа, который усиливает низкочастотное содержимое. Он основан на комбинировании низкоамплитудного/низкочастотного свипа со стандартным свипом, избегая таким способом эксплуатационные ограничения вибратора.

Крупный современный вибратор снабжен гидравлическим блоком питания, который способен развивать гидравлическую мощность более 200 кВт. На низких частотах, только малая доля этой энергии излучается в землю, еще меньшая эффективность излучения получается на твердых поверхностях. На рисунке 1 показана общая излучаемая мощность для вибратора Р-волн, работающего на иле. В эту оценку входит излучение волн Релея, SV-волн, и Р-волн. Вклад Р-волн в общее дело – менее 5% на низких и средних частотах (Baeten and Ziolkowski, 1990). Для генерирования еще более скромного количества сверхнизкочастотной энергии требуется существенное время воздействия. К счастью, излучения низких частот по мере распространения в толще Земли поглощаются не так сильно, как затухают высокие частоты.

При исследовании низких частот, было использовано моделирование сейсмического вибратора для идентификации ключевых факторов, которые ограничивают выходную энергию вибратора. Интересующая полоса частот – 2-10 Гц. Основной целью было получение полезных рекомендаций для генерирования экономически рентабельным способом низкочастотной энергии свипа 'хорошего качества' в соответствии с ограничениями регистрирующей аппаратуры. Для высокочастотных исследований был разработан и встроен в технологию клапанов Pelton DR новый высокочастотный контроллер для ослабления высокочастотного резонанса, вызываемого системой сервоклапанов и увеличения полосы частот системы сервоклапанов. При вибрировании с большим усилием была достигнута полоса частот 250 Гц.

ION Geophysical Corporation, 12300 Parc Crest Drive, Stafford, TX 77477, USA. E-mail: John.Wei@iongeo.com.

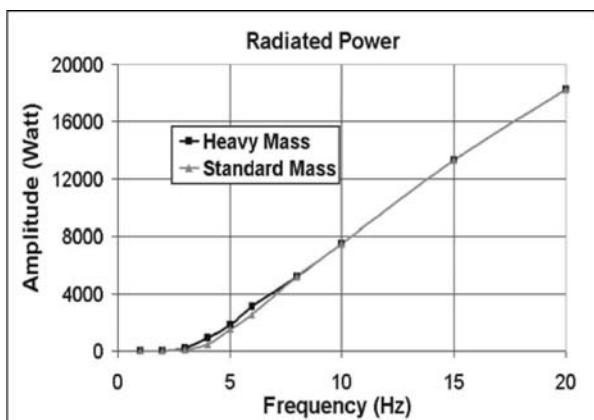


Рисунок 1 Оцененная общая излученная мощность для вибратора, работающего на поверхности илестого грунта (модельная жесткость почвы: $6.0e7$ Н/м, и вязкость: $5.0e5$ Н·с/м).

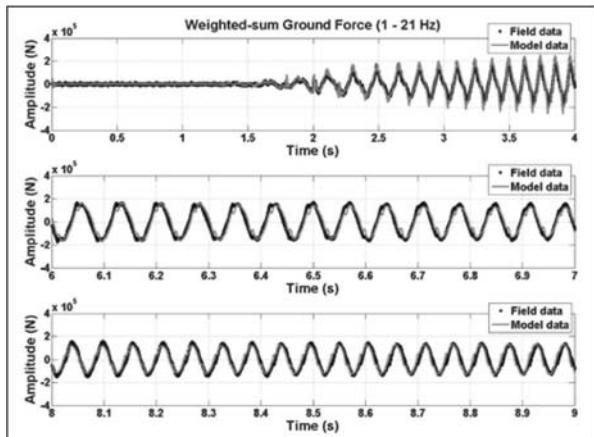


Рисунок 2 Оценки взвешенной суммы толкающего усилия по сравнению с измерениями и модельными данными. Верхнее окно имеет диапазон 0-4 с, и покрывает диапазон частот 1-9 Гц; среднее окно имеет диапазон 6-7 с, и покрывает частоты 13-15 Гц; нижнее окно относится к 8-9 с, и покрывает частоты 17-19 Гц. Взвешенная сумма толкающего усилия, измеренная в поле, представлена черными точками, тогда как взвешенная сумма толкающего усилия, сгенерированная моделью, показана серой линией.

Реактивная масса	5,003 (кг)
Масса базовой плиты	1,825 (кг)
Соотношение реактивной массы и массы базовой плиты	2.74
Удерживаемый вес	289,120 (Н)
Пиковая сила прижимания плиты	266,880 (Н)
Подача гидронасоса	605.7 (литр/мин)
Подача клапана основной ступени	908.5 (литр/мин)
Аккумулятор	9.4635 (литр)
Подключенный аккумулятор	0.885 (литр)
Используемый ход реактивной массы	9.83 (см)
Используемый ход клапана основной ступени	0.254 (см)

Таблица 1 AHV-IV Модель 362HD, приведены спецификации вибратора.

Оценка низкочастотной модели

Моделирование вибратора осуществлялось на основе модели 362HD компании I/O AHV-IV (стандарт 362, который был модифицирован с использованием тяжелой реактивной массы), характеристики которого приводятся в Таблице 1. Мы смоделировали систему подачи гидравлической энергии, динамические характеристики и пропускную способность сервоклапана, реактивную массу и систему контакта опорная плита/грунт, и электронный контроллер VibPro. Система подачи гидравлической энергии включает гидравлический насос, все шланги и соединительные трубы, гидравлические масляные фильтры и аккумуляторы. Модель сервоклапана базируется на клапане управления Moog 760, клапане основной ступени Atlas 240H, и контуре обратной связи гидравлического сервопривода. Реактивная масса и система интерфейса базовая плита – поверхность земли использует передаточную функцию высокого порядка, основанную на полевых измерениях в целях описания связи между частотной характеристикой ускорения реактивной массы и базовой платы. Передаточная функция включает резонанс грунта и резонанс изгиба базовой платы с полосой частот до 200 Гц.

Для того чтобы провести достоверное изучение границ фундаментальной силы на низких частотах, требовалась точная модель. Для оценки модели путем сравнения с полевыми данными применялся линейный свип с возрастанием частот 1-21 Гц длительностью 10 с. У этого свипа имеется косинусное окно краевого сглаживания длительностью 1 с в начале и 0.5 с в конце. Уровень выходной силы устанавливается на 186,818 Н. На рисунке 2 сравниваются графики взвешенных сумм толкающего усилия в трех временных рамках. Между толкающим усилием, рассчитанным по модельным и полевым измерениям имеется хорошее соответствие на всей полосе частот свипсигнала, что таким образом, подтверждает пользу моделей при низкочастотных исследованиях. Сравнения (не приведенные здесь), выполненные с током момента двигателя клапана управления, смещением реактивной массы, и перемещением клапана основной ступени, говорят в пользу эффективности модели.

Результаты низкочастотной модели

В этом модельном исследовании использовались свип-сигналы с одной частотой. Каждый свип на одной частоте длился 5 с в целях того, чтобы достичь механических и гидравлических пределов. Более того, за это время будет достигнута максимальная стационарная фундаментальная сила. Требуемая целевая сила равна 186,816 Н (42,000 фунт). Модель вибратора запускалась с двумя различными значениями веса реактивной массы. Одна называлась 'тяжелая масса' и имела вес 5003 кг. Другая называлась 'стандартная масса' и имела вес 3683 кг.

Ниже граничной частоты 4 Гц для тяжелой массы и 5 Гц для стандартной массы, ограничивающим фактором является ход реактивной массы. Ее перемещение от пика до пика достигает своего предела (9.83 см) как показано на Рисунке 3а. Ниже этой граничной частоты, смещение клапана главной ступени показано на Рисунке 3б, пиковое прижимное усилие показано на Рисунке 4б, а на Рисунке 5 приведены подача гидронасоса, так и подача клапана основной ступени, которые не превысили своих пределов. Для этих параметров все еще имеется избыточная емкость.

Выше граничной частоты хода массы и до 8 Гц, как показано на Рисунке 4б, прижимная сила на грунт достигает границы (266,880 Н).

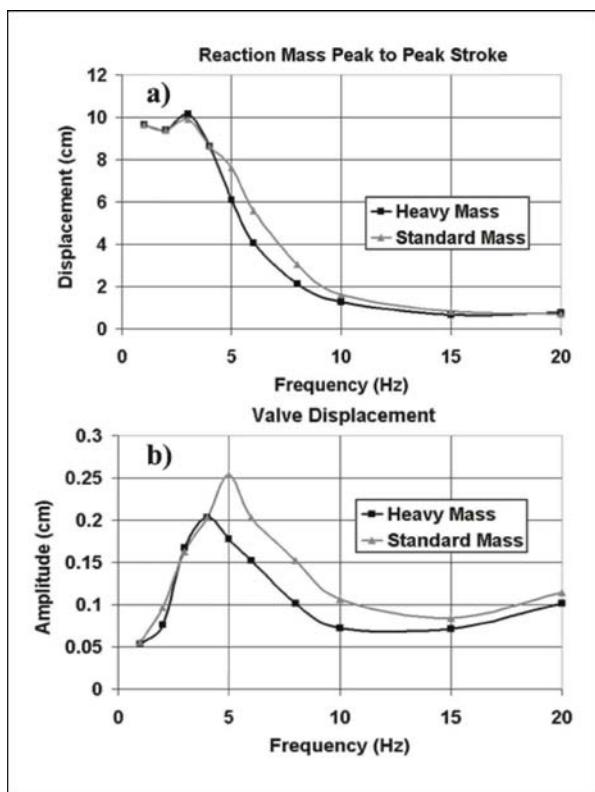


Рисунок 3 (a) Смещение реактивной массы от пика до пика.
(b) Смещение клапана основной ступени.

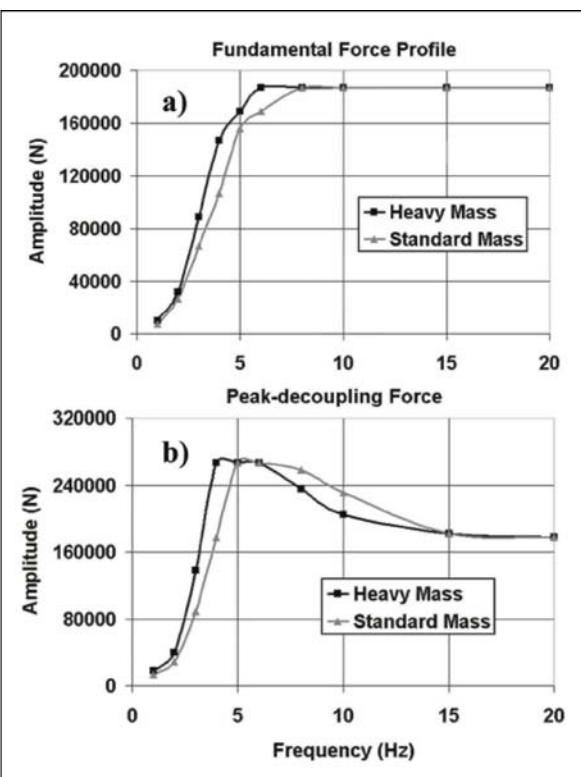


Рисунок 4 (a) Кривая фундаментальной силы на низких частотах.
(b) Пиковая сила отрыва на низких частотах.

В свою очередь, это ограничивает фундаментальную силу на выходе вибратора. Установление границы усилия на грунте предназначено для предотвращения потери контакта между базовой плитой и грунтом с помощью электронного контроллера. В этом частотном диапазоне смещение от пика до пика реактивной массы больше не является ограничивающим фактором, поскольку ее перемещение уменьшается существенно. Смещение клапана основной ступени, подача гидронасоса и выходной поток клапана основной ступени также гораздо ниже своих пределов. Уровень выходной энергии вибратора полностью определяется пределами пиковой силы отрыва базовой плиты грунта. Причиной этого является то, что пиковая сила отрыва плиты достигает своего предела при таких низких частотах из-за гармонических искажений, вносимых сервоклапаном на клапане основной ступени. Это вызывается нелинейной зависимостью в форме квадратного корня между выходным потоком клапана основной ступени, смещением клапана основной ступени и дифференциальным давлением на отверстии управления клапана основной ступени. По мере того, как происходит дальнейшее открытие основной ступени сервоклапана, нелинейная связь в форме квадратного корня становится более значимой. Искажение на нечетных гармониках, особенно третьей гармонике, создает большие пики. Частоты выше 10 Гц здесь не рассматриваются, поскольку они лежат вне границ нашего интереса.

На граничной частоте 4-5 Гц, смещение реактивной массы от пика до пика, смещение клапана основной ступени, пиковая сила отрыва плиты, подача гидронасоса и расход клапана основной ступени находятся вблизи своих пределов. Уровень

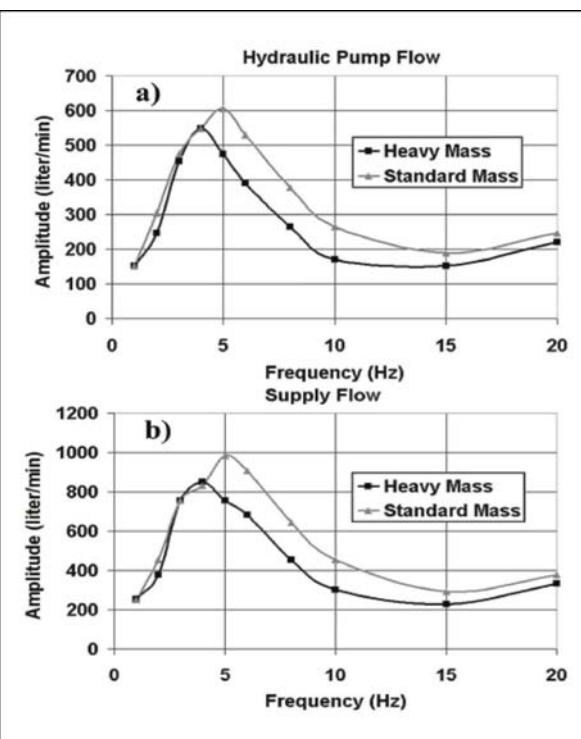


Рисунок 5 (a) Средняя подача гидронасоса. (b) Пиковый расход на отверстии управления клапана основной ступени.

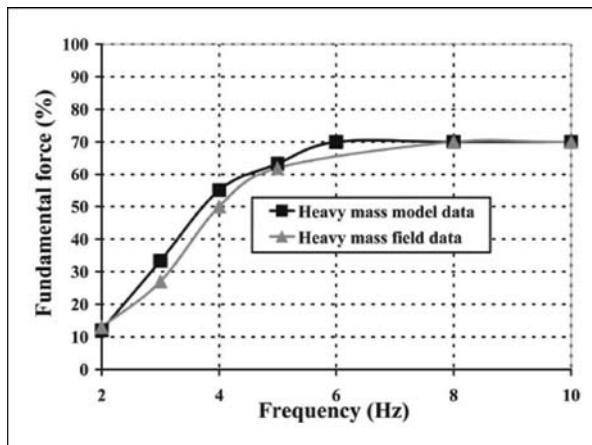


Рисунок 6 Фундаментальная сила вибратора AHV-IV.

Выходной энергии вибратора на граничной частоте определяется комбинацией всех этих предельных величин. Граничная частота может смещаться к более низким частотам путем увеличения веса реактивной массы.

На рисунке 4а показаны два графика фундаментальной силы для модели вибратора как для большой массы, так для стандартной массы. Они описывают максимальные значения фундаментальной силы на выходе, которые может достигать на низких частотах вибратор AHV-IV. Выходная фундаментальная сила на 1-6 Гц увеличивается с 6 дБ/октаву до тех пор, пока не достигнет плато на 6 Гц для большой массы и 8 Гц для стандартной массы. При переходе в полосе частот 1-6 Гц для большой массы и 1-8 Гц для стандартной массы фундаментальная сила увеличивается, однако целевая фундаментальная сила не достигается. Как сказано ранее, это вызывается преимущественно наличием ограничений хода реактивной массы от пика до пика и пиковой силе отрыва. На рисунке 4а также демонстрируется, что переходная полоса частот на графике фундаментальной силы для большой массы более узкая, чем на графике для стандартной массы, и что можно получить большее значение фундаментальной силы на выходе при наличии большой массы, чем для стандартной массы. Увеличение веса

реактивной массы помогает существенно сократить ширину переходной полосы частот, и таким образом увеличить способность генерировать высокую фундаментальную силу на очень низких частотах (менее 8 Гц).

Результаты полевого тестирования низких частот

Установив эксплуатационные пределы вибраторов в низкочастотном диапазоне, мы захотели проверить эти результаты на основе экспериментальных данных. Данные были собраны в поле, используя вибратор AHV-IV, оснащенный большой массой. По соображениям безопасности, смещение реактивной массы, пиковое усилие и смещение клапана основной ступени были установлены максимум на 90% от их пиковых значений. Целевая фундаментальная сила, которая должна была быть достигнута, равна 70% максимального пикового усилия. Между данными, рассчитанными при моделировании и экспериментальными данными в поле, наблюдается хорошее соответствие. На рисунке 6 показана точность предсказания модельной фундаментальной силы.

Как можно видеть на Рисунке 6, ниже 4 Гц фундаментальная сила все еще гораздо ниже, чем требуемые 70% от максимума. На рисунке 7 показано как смещение реактивной массы ограничивает фундаментальную силу в этой области. Смещение реактивной массы достигло здесь установленного порога безопасности в 90%. Фундаментальная сила в этом частотном диапазоне не может быть увеличена без достижения большей величины смещения реактивной массы.

Полевые данные на рисунке 6 показывают, что фундаментальная сила не достигает желаемых 70% от максимума до достижения около 8 Гц. Сравнение с Рисунком 8 демонстрирует, что в диапазоне 4-8 Гц выходное значение фундаментальной силы ограничивается пиковой силой отрыва. Пиковая сила отрыва достигло здесь 90% порога безопасности. Требуемая фундаментальная сила не может быть достигнута без увеличения пиковой силы отрыва в этом частотном диапазоне.

Показатели системы сервоклапанов на высоких частотах

Также были выполнены исследования системы сервоклапанов и для высокочастотных свипов.

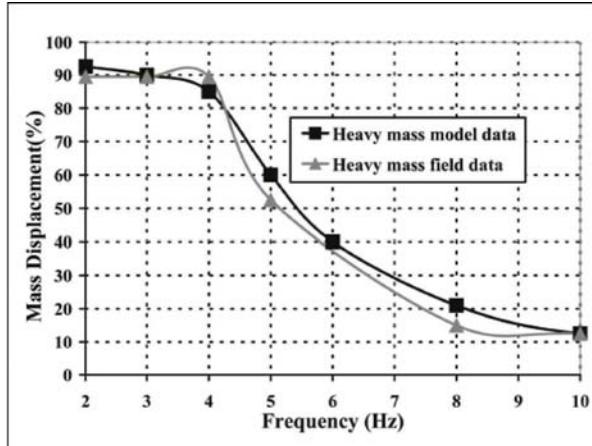


Рисунок 7 Смещение реактивной массы вибратора AHV-IV.

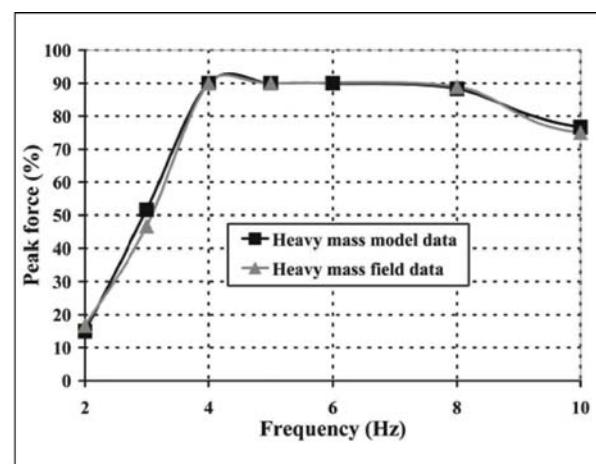


Рисунок 8 Пиковое усилие вибратора AHV-IV.

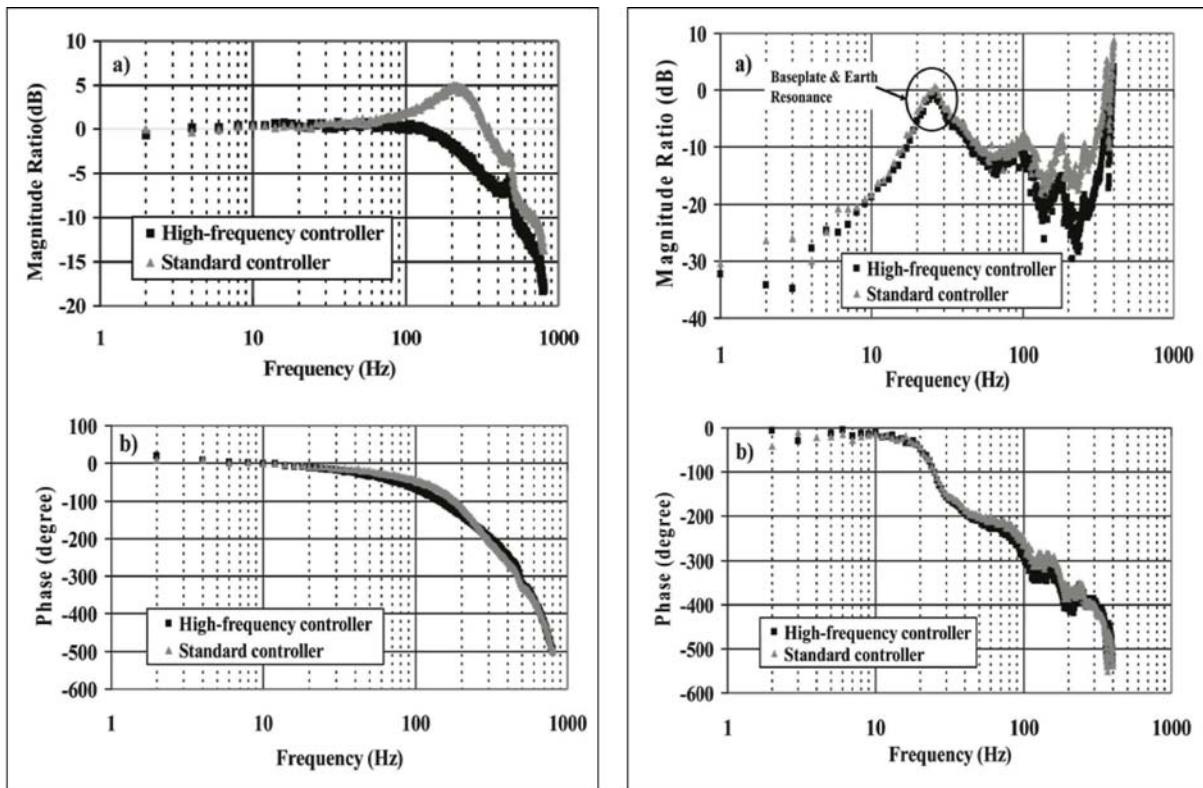


Рисунок 9 Частотная характеристика сервоклапана с обратной связью: (a) график отношения амплитуд, (b) график фаз. Рисунок 10 Частотная характеристика взвешенной суммы усилия на грунт: (a) график отношения амплитуд, (b) график фаз.

Исполнительный механизм современного сейсмического вибратора **Изгиб базовой плиты вибратора на высоких частотах** обычно приводится в движение системой гидравлических клапанов, состоящих из управляющего сервоклапана Moog Согласно широко принятой модели (Sallas, 1984), выходное 760-928A и сервоклапана основной ступени Atlas 240H. При усилие на грунт вибратора равно средневзвешенной сумме поддержке управляющей электроникой, можно установить реактивных масс и ускорений базовой плиты. На рисунке 10 добавочный клапан Pelton DR между управляющим сервоклапаном показана частотная характеристика взвешенной суммы и сервоклапаном основной ступени вибратора. С этой опцией, усилия на грунт. Влияние ускорения базовой плиты на усилие сервоклапан основной ступени преобразуется из сервоклапана на грунт пренебрежимо мало на низких частотах и управления потоком в сервоклапан управления давлением (Reust, увеличивается до резонансной частоты базовой плиты и 1993). Амплитудные и фазовые погрешности фундаментальной грунта согласно рисунку 10а. Реальные резонансные частоты силы станут меньше, а управление более точным. Кроме того, базовой плиты и грунта зависят от упругих параметров резонанс базовой плиты и грунта будет демпфироваться и грунта и жесткости базовой плиты, но обычно лежат в иметь меньшее влияние на фундаментальную силу и подстройку частотном диапазоне от 15-30 Гц. Влияние резонанса фазы, что уменьшит гармонические искажения.

На рисунке 9 приводится сравнение частотной характеристики резонансные частоты изгиба базовой плиты доминируют. Сервоклапана с обратной связью для стандартного контроллера и нового высокочастотного контроллера. Отношение амплитуд показано на рисунке 9а, а фаз на рисунке 9б. Клапан Pelton DR имеет базовую плиту с весом более 1590 кг (3500фунтов). По мере того, как частота свипа становится выше 30 Гц, динамическое влияние веса базовой плиты нельзя учитывать. Выше 30 Гц, генерируемые силы используются для приведения в движение грунта и массы базовой плиты. Это вызывает возникновение дифференциального давления на поршне, которое приближается или превышает давление гидравлического питания.

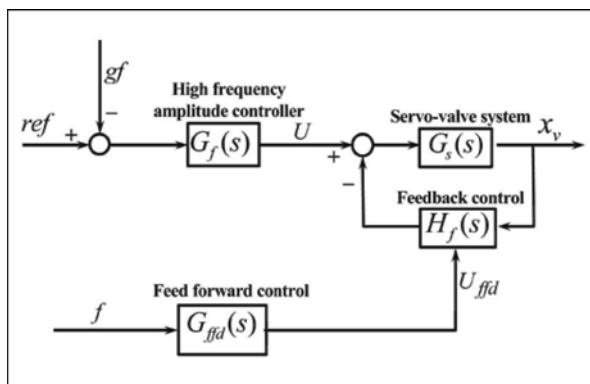


Рисунок 11 Гибридные системы управления для широкой полосы частот.

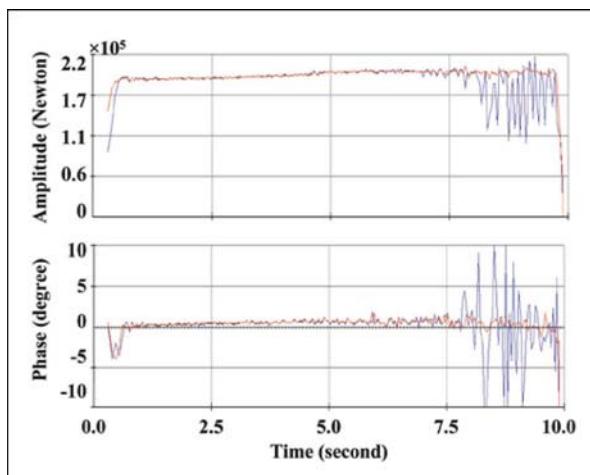


Рисунок 12 Показатели вибратора с высокочастотным контроллером и стандартным контроллером на гравийной дорожке в Sealy, Техас: (a) регулировка амплитуды фундаментальной силы, (b) регулировка фазы.

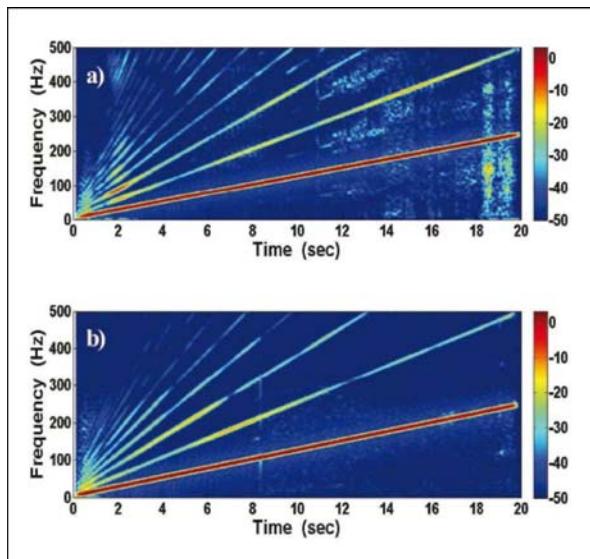


Рисунок 13 Взвешенная сумма усилия на грунт вибратора AHV-IV до 250 Гц на гравийной дорожке в Waller, Техас: (a) при использовании стандартного контроллера, (b) при использовании высокочастотного контроллера.

В итоге, будет генерироваться более высокочастотный шум и возможно будет наблюдаться нестабильная работа сервоклапана. Между тем в сервоклапане может происходить образование каверн и он будет быстро изнашиваться.

Внутри высокочастотного контроллера к регулировке амплитуд фундаментальной силы применяется малое усиление по мере того, как вибраторы дают свип на высоких частотах. На рисунке 10а иллюстрируется, что выше 100 Гц низкое усиление сокращает вариации амплитуд.

Высокочастотный контроллер

На рисунке 11 отображается высокочастотный контроллер. Централизованное управление системы сервоклапанов, представленное $G_s(s)$, сопровождается тремя алгоритмами управления, выраженнымными амплитудным контроллером высоких частот $G_f(s)$, контроллером прямой связи $G_{ffd}(s)$, и контроллером обратной связи $H_f(s)$. В процессе калибровки, выполняемом перед работой вибратора, система сервоклапанов автоматически стабилизируется контроллером обратной связи. Когда вибратор выбирает, контроллер прямой связи подает переменное усиление для регулировки контроллера обратной связи. Путем регулировки контроллера обратной связи, подавляются высокочастотные резонансы в сервоклапане. Величина регулировки основана на частоте свипа. С помощью такого устройства может достигаться широкая полоса частот системы сервоклапанов, как показано на Рисунке 9а.

Известно, что применение большого усиления на низких частотах улучшает управляющее слежение и подавление помех. Низкое усиление на высоких частотах улучшает фазовые характеристики и стабильность управления. Эти принципы, применяемые в устройстве высокочастотного контроллера амплитуд, подавляют высокочастотный резонанс, вызванный изгибом базовой плиты. Это показано на рисунке 10а.

Тестиирование в поле высокочастотных данных

На рисунке 12 показано амплитудное и фазовое сравнение взвешенных сумм усилия на грунт для стандартного контроллера и высокочастотного контроллера. Каждый контроллер был установлен на вибраторе AHV-IV со включенным клапаном Pelton DR. При тестировании, каждый контроллер выполнял линейный свип на частотах 5-240 Гц длительностью 10 с. Ясно, что высокочастотный контроллер (красная линия) дает ровный амплитудный спектр и гладкий фазовый спектр на всех частотах свипа. Стандартный контроллер (синяя линия) может поддерживать ровный амплитудный спектр и гладкий фазовый спектр ниже 180 Гц. На частотах свипа выше 180 Гц, происходит нестабильность в работе вибратора.

На рисунке 13 показаны графики спектра частота-время средневзвешенной суммы усилия на грунт для вибратора AHV-IV со свипом 5-250 Гц длительностью свыше 20 с. Клапан Pelton DR был установлен и включен. Вибратор по очереди управлялся стандартным контроллером и высокочастотным контроллером. На рисунке 13а показано, что со стандартным контроллером, осцилляции сервоклапана начинаются на 11 с вокруг 150 Гц. В конце свипа, с 18 с (230 Гц) до 20 с (250 Гц), система сервоклапанов нестабильна и генерируется сильный шум. Рисунок 13б указывает на то, что сервоклапан стабилен для всей полосы частот свипа сигнала при использовании высокочастотного контроллера. Кроме того, увеличивается фундаментальная сила,

особенно на низких частотах. Значительно подавляется гармонические искажения, особенно для второй и третьей гармоник.

Заключение

Ход реактивной массы от пика до пика и пиковая сила отрыва – два ключевых фактора, которые ограничивают энергию, которая может быть передана в землю вибратором Р-волн. Ход реактивной массы от пика до пика сильнее доминирует на очень низких частотах. По мере роста частоты пиковая сила отрыва ограничивает выходные характеристики вибратора. Границная частота между этими двумя факторами попадает на 4-5 Гц в зависимости от веса реактивной массы. Чем больше вес реактивной массы, тем ниже становится границная частота. Чем больше масса, тем большая фундаментальная сила генерируется вибратором, которая достигается быстрее. Поскольку выходная энергия на низких частотах для вибратора ограничивается ходом реакционной массы от пика до пика и пиковой силой отрыва, вибратор с большим ходом, большим весом реактивной массы и высоким удерживаемым весом хорошо подходит для генерирования большой фундаментальной силы на низкой частоте.

Полоса частот сервоклапан и изгиб базовой плиты – два ключевых фактора, которые ограничивают характеристики вибратора на высокой частоте. Был разработан и применен контроллер высоких частот, который демпфирует высокие

резонансные частоты, определяемые сервоклапаном и изгибом базовой плиты и расширяет полосу частот сервоклапана. С помощью этого контроллера высоких частот, полоса частот вибратора была расширена до 250 Гц и вибратор может иметь стабильные показатели в широком диапазоне частот.

Литература

- Bell, D.W. [1986] Acquisition and utilization of broad-band signals containing 2-8 Hz reflection energy. *55th Meeting Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstracts, 443-446.
- Baeten, G. and Ziolkowski, A. [1990] *The Vibroseis Source*. Elsevier Press, New York.
- Bagaini, C. [2006] Enhancing the low-frequency content of Vibroseis data. *76th Meeting Society of Exploration Geophysicists*, Expanded Abstracts, 75-79.
- Jeffryes, B. and Martin, J. [2003] *Method and apparatus for increasing low frequency content during vibroseismic acquisition*. United Kingdom Patent 0415518.0.
- Mougenot, D. [2005] Pushing toward the low frequencies. *World Oil*, 226, 9.
- Reust, K.D. [1993] Enhanced servovalve technology for seismic vibrators. *Geophysical Prospecting*, 41, 43-60.
- Sallas, J.J. [1984] Seismic vibrator control and the downgoing P-wave. *Geophysics*, 49, 732-740.

Received 31 October 2007; accepted 10 December 2007.

