

Насколько критичны гармонические искажения в вибросейсморазведке? Причины их возникновения и способы подавления

■ Гафаров Р.М., АО «Башнефтегеофизика», г. Уфа.

В данной статье представлены причины возникновения гармоник на основе физического процесса. Подробно рассмотрена область смещения гармоник, как при стандартных работах, так и с использованием высокопроизводительной методики. Обоснована необходимость борьбы с гармониками на стадии формирования виброграмм.

Введение

Значение вибросейсморазведки в полевой геофизике постоянно возрастает, особенно при отработке крупных площадей в 1000 квадратных километров и более. Для повышения производительности используются такие высокопродуктивные методы, как методика перекрывающихся свип-сигналов Slip Sweep [1] или методика независимого возбуждения свип-сигналов ISS. При этом излучаемый свип-сигнал имеет неидеальную форму, в нём содержатся искажения, вызванные сопротивлением грунта, получившие название гармонических [3]. Если применение обычных методов с одной-двумя группами вибраторов не оказывает влияния на волновое поле получаемых сейсмограмм, то в методике Slip Sweep происходит наложение гармонических искажений (гармоник) на волновое поле предыдущей коррелограммы. При этом величина амплитуды гармоник, в зависимости от свойств грунта может достигать на низких частотах до 10-15% от амплитуды основного сигнала, что требует разработки методов их подавления.

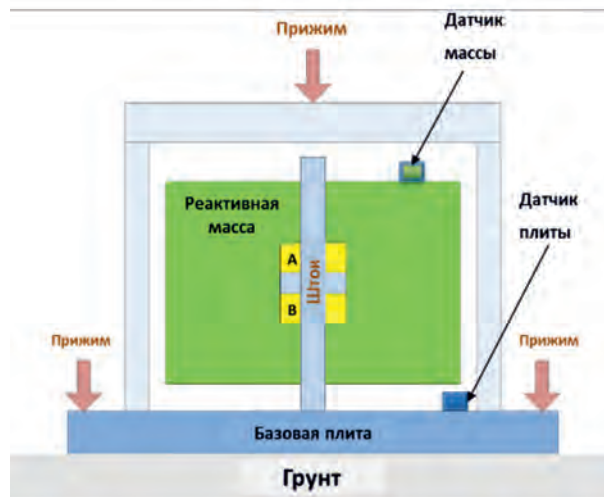
Причины возникновения гармонических искажений

Итак... откуда возникают гармонические искажения?

На рисунке 1 схематически изображен возбудитель вибрации сейсмического вибратора. На штоке, под давлением масла, свободно перемещается реактив-

ная масса. Шток жёстко соединён с плитой, прижатой к грунту. Для того контроля перемещений массы и плиты на них установлены датчики-акселерометры. Однако конструкторы заметили существенные расхождения в показаниях датчиков: при совпадении по частоте их амплитуды кардинально отличаются.

▼ Рис. 1. Возбудитель вибрации.



На рисунке 2 приведены графики со всех возможных сигналов вибратора. Из них жёлтый — сигнал с плиты, а коричневый — с массы. Почему они так отличаются? Расхождение в амплитудах сигналов объясняется динамикой массы, свободно перемещающейся на штоке и на низких частотах у неё амплитуда колебаний велика, а к высоким частотам уменьшается, так как масса не успевает на высоких частотах набрать амплитуду. У жёлтого датчика плиты наоборот — на низких частотах грунт гасит её колебания,

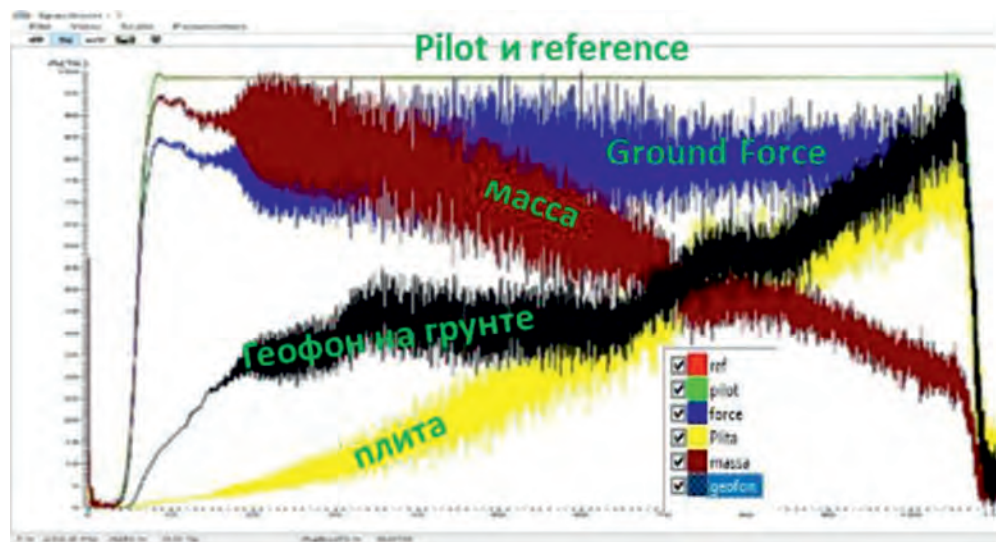


Рис. 2.
Графики
сигналов,
зарегистри-
рованных
в процессе
процедуры
сверки.

который сопротивляется (у грунта нет таких свойств, чтобы колебаться с высокой амплитудой), а на высоких она успевает вибрировать и несмотря на малую амплитуду из-за большой частоты колебаний суммарная энергия возрастает.

Как по различным графикам контролировать равномерность развёртки реального сигнала? Конструкторы решили пойти по пути суммирования этих двух сигналов и назвали его Ground Force (усилие на грунт). Дополнительно, в процессе дальнейших исследований вибратора узнали, что усилие на грунт также зависит от веса плиты и веса массы. Чем больше их масса, тем более мощный сигнал вибратор излучает. Поэтому добавили в формулу ещё и веса массы и плиты:

излучения свип-сигнала. Первое слагаемое характеризует вклад реактивной массы, а второе вклад опорной плиты. Амплитудная характеристика расчётного сигнала Ground Force получается относительно равномерной (на рисунке 2 он показан синим цветом) и с ним уже можно работать и сравнивать его амплитуду со свип-сигналом.

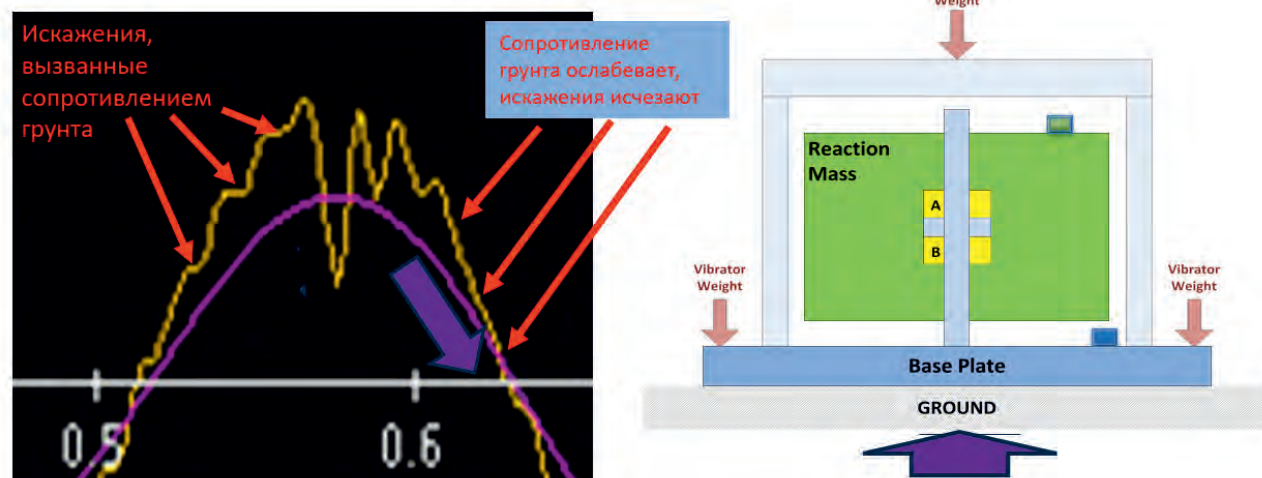
Далее переходим непосредственно к причинам возникновения гармоник. На рисунке 3 детально отображается весь процесс возникновения гармонических искажений. В левой части рисунка крупно показан один полупериод двух сигналов на временной оси – модельный пилот (сиреневый цвет) и расчётный Ground Force (жёлтый цвет). Пилот не содержит искажений, Ground Force существенно

$$\text{Ground Force} = \underbrace{\text{Mass}_{\text{mass}} \times \text{Acc}_{\text{mass}}}_{\text{Вклад реактивной массы}} + \underbrace{\text{Mass}_{\text{baseplate}} \times \text{Acc}_{\text{baseplate}}}_{\text{Вклад опорной плиты}}$$

где $\text{Mass}_{\text{mass}}$ – масса реактивной массы, Acc_{mass} – показания акселерометра массы, $\text{Mass}_{\text{baseplate}}$ – масса плиты, $\text{Acc}_{\text{baseplate}}$ – показания акселерометра плиты

В настоящее время по данной формуле производят расчёт усилия, которое сейсмовибратор развивает в процессе

искажён. Давайте детально рассмотрим данный полупериод. Когда амплитуда управляющего сигнала возрастает, это



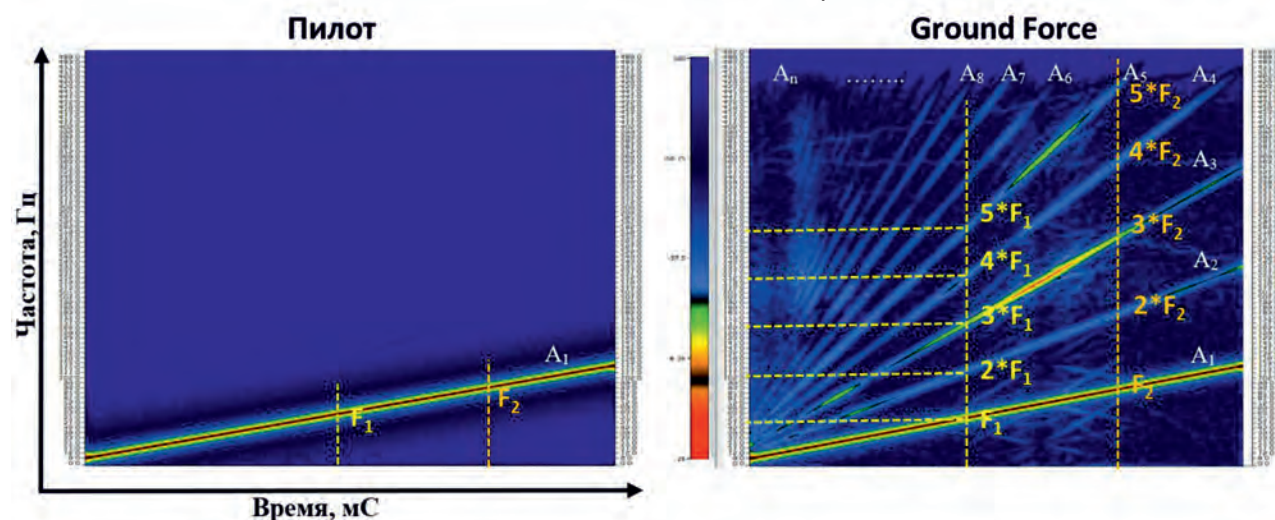
▲ Рис. 3. Процесс возникновения гармоник.

значит, что плита движется вниз. При этом грунт начинает сопротивляться, давит вверх и появляются искажения. А когда амплитуда пилота уменьшается, плита отжимается от грунта, нагрузка на грунт исчезает и, как следствие искажения заканчиваются, Ground Force выполаживается. Поэтому всегда, когда свип-сигнал переходит через ноль, также через ноль переходит и Ground Force. Это очень важный вывод для понимания процесса! Из этого вывода следует, что в ОДИН отдельный полупериод свип-сигнала всегда укладывается несколько полупериодов гармоник Ground Force!!! В зависимости от свойств грунта оно может быть различным, но всегда

целым!!! Поэтому, разложив оба сигнала в частотно-временной области видим, что пилот имеет только одну гармонику (A_1), а Ground Force дополнительно состоит из множества гармоник (A_2, A_3, A_4 и т.д.), кратных основной (Рис.4).

Название «гармоника» появилось из октавности музыкальных инструментов, где каждая следующая октава отличается частотами в два раза выше, чем у предыдущей. А геофизикам важно знать, что излучаемый сейсмовибратором сигнал уже содержит в себе искажения, названные гармоническими, появление которых связано с сопротивлением грунта. Частоты этих искажений кратны частоте основного опорного сигнала, причём их

▼ Рис. 4. Разложение пилота и Ground Force в частотно-временной области.



количество и интенсивность зависят от свойств грунта.

Причины возникновения гармоник мы выяснили. А как они влияют на регистрируемое волновое поле и на динамику получаемых сейсмограмм? Это крупный раздел, в котором, для дальнейшего понимания необходимо детально разобрать принцип расчёта функции взаимной корреляции.

Функция взаимной корреляции (ФВК)

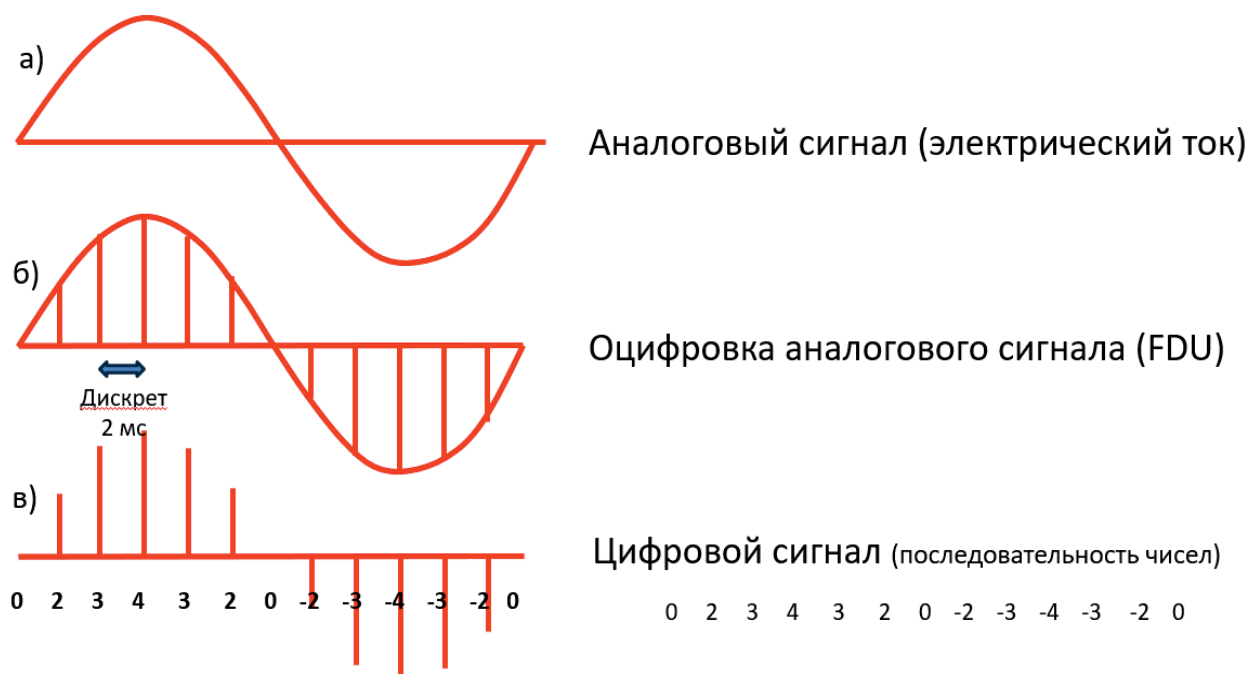
Для понимания принципа расчёта ФВК вспомним, для чего производится оцифровка регистрируемого сейсмического сигнала (рис.5). Когда геофон регистрирует сигнал, на концах катушки возникает разность потенциалов (рис.5а). Этот сигнал – аналоговый и с ним невозможно производить необходимые геофизикам манипуляции, разве что изменять амплитуду при помощи сложных аналоговых схем. Совсем по другому дело обстоит с цифровым сигналом, способным кардинально трансформироваться при проведении различных арифметических процедур. И для его получения через

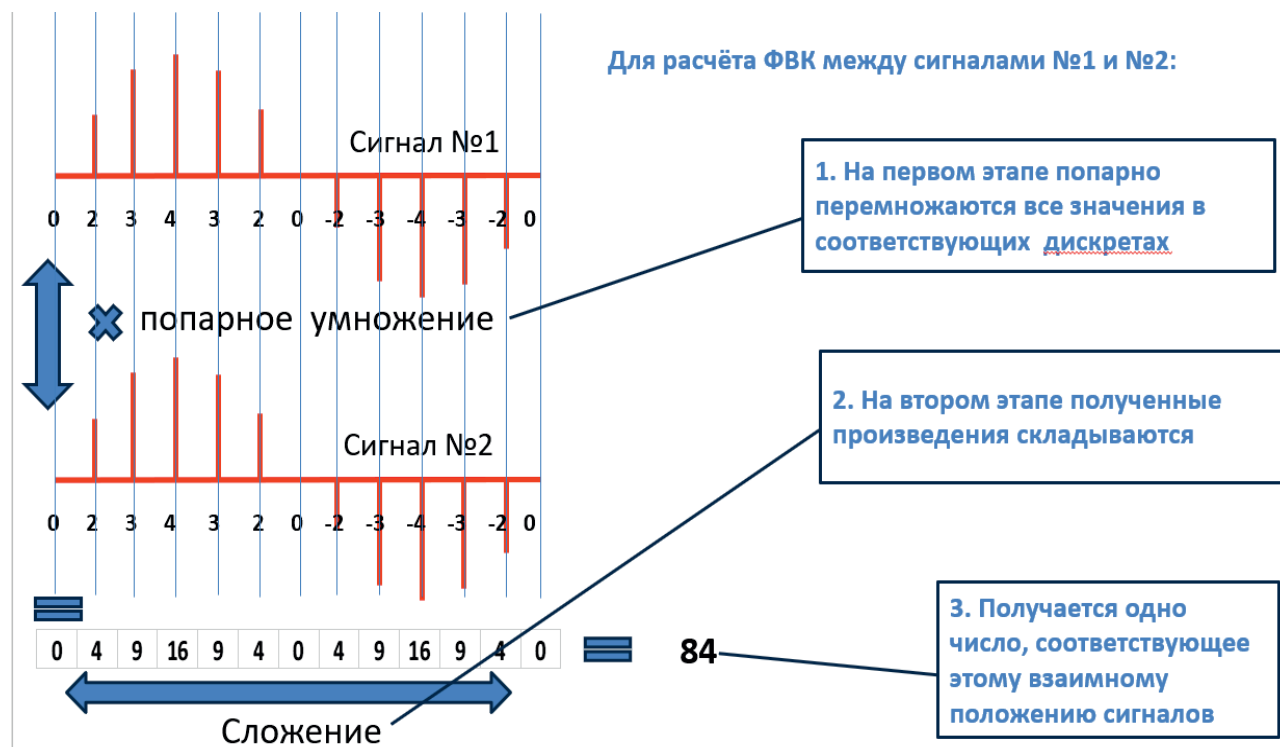
каждые, в данном случае 2 мс (рис.5б), замеряют напряжение электрического тока и запоминают его в числовом виде. В результате оцифровки наш сигнал отображается в виде последовательности чисел (рис.5в), характеризующих напряжение каждого отсчёта с выбранным шагом дискретизации.

Именно с данной последовательностью чисел и производятся процедура, получившая название функции взаимной корреляции двух сигналов. Надо сразу сказать, что ФВК, *это чисто математическая процедура*, призванная установить степень схожести двух сигналов. Она не имеет никаких физических и тем более геологических смыслов. Она нужна только для того, чтобы установить: *насколько нужно сдвинуть по времени один сигнал относительно другого, чтобы они стали максимально похожи*. Принцип расчёта ФВК для одного взаимоположения двух сигналов детально показан на рисунке 6.

Полный цикл расчёта ФВК показан на рисунке 7. Один сигнал (№1), показанный на средней оси времён, остаётся

▼ Рис. 5. Оцифровка сейсмического сигнала.





▲ Рис. 6. Расчёт одного значения ФВК при неизменном положении сигналов.

всегда неподвижен на шкале времён. Другой сигнал (№2), на нижней оси времён, устанавливается максимально влево чтобы оба сигнала пересекались только одним дискретом (Рис.7/1). Это положение – начало расчёта ФВК. В этом положении производится расчёт значения ФВК, как это показано на рисунке 6. Далее нижний сигнал сдвигается на один дискрет и расчёт повторяется (Рис.7/2). Если поочерёдно смотреть на слайды, то видно, как на верхней оси появляются значения ФВК (Рис.7/2-26).

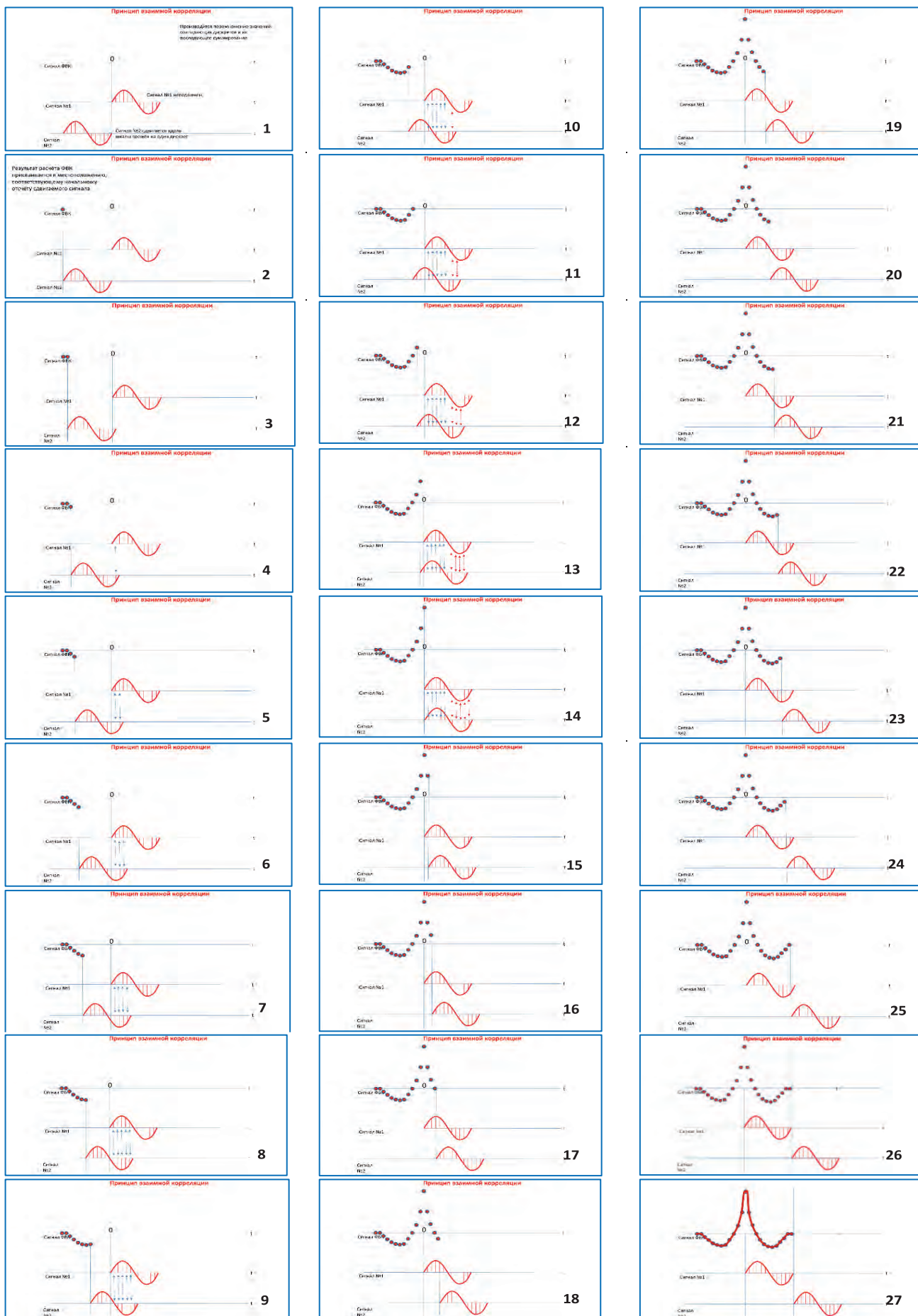
Важно! Значения ФВК по времени привязываются к крайнему левому значению сдвигаемого сигнала. Это условие, заложенное в сам принцип расчёта, является основополагающим при дальнейшем изучении влияния гармонических помех на область полезного сигнала коррелограммы.

На рисунке 7 видно, что значение ФВК имеет максимальное значение, когда оба сигнала максимально совпадают по положительным и отрицательным фазам. Отрицательные фазы тоже вносят

свой вклад, так как при перемножении отрицательных значений, результат будет положительным. С другой стороны, ФВК имеет максимально отрицательное значение, когда сигналы оказываются в противофазе. Математически, смысл расчёта ФВК состоит в том, чтобы программа поняла «на сколько миллисекунд надо сдвинуть один сигнал относительно другого, чтобы они стали максимально похожи».

В геофизике, в процессе обработки это свойство ФВК позволяет производить пикирование первых вступлений, корреляцию горизонтов и т.д.

А как же ФВК применяется в виброрейсморазведке? В процессе отработки пункта возбуждения сейсмостанция регистрирует виброграмму, каждая из трасс которой представляет собой сигнал Ground Force, прошедший путь до отражающего горизонта и обратно. Интерференция Ground Force от различных отражающих горизонтов представляет собой хаос, исключающий возможность какой-либо интерпретации (Рис.8а). Здесь на



▲ Рис. 7. Полный цикл расчёта ФВК.

помощь приходит ФВК. При корреляции виброграммы со свип-сигналом (Рис.8б) длинная вибропосылка «сжимается» в короткий импульс (Рис.8в) и образуется коррелограмма, вполне сопоставимая с привычным нам образом сейсмограммы от импульсного источника (Рис.8г).

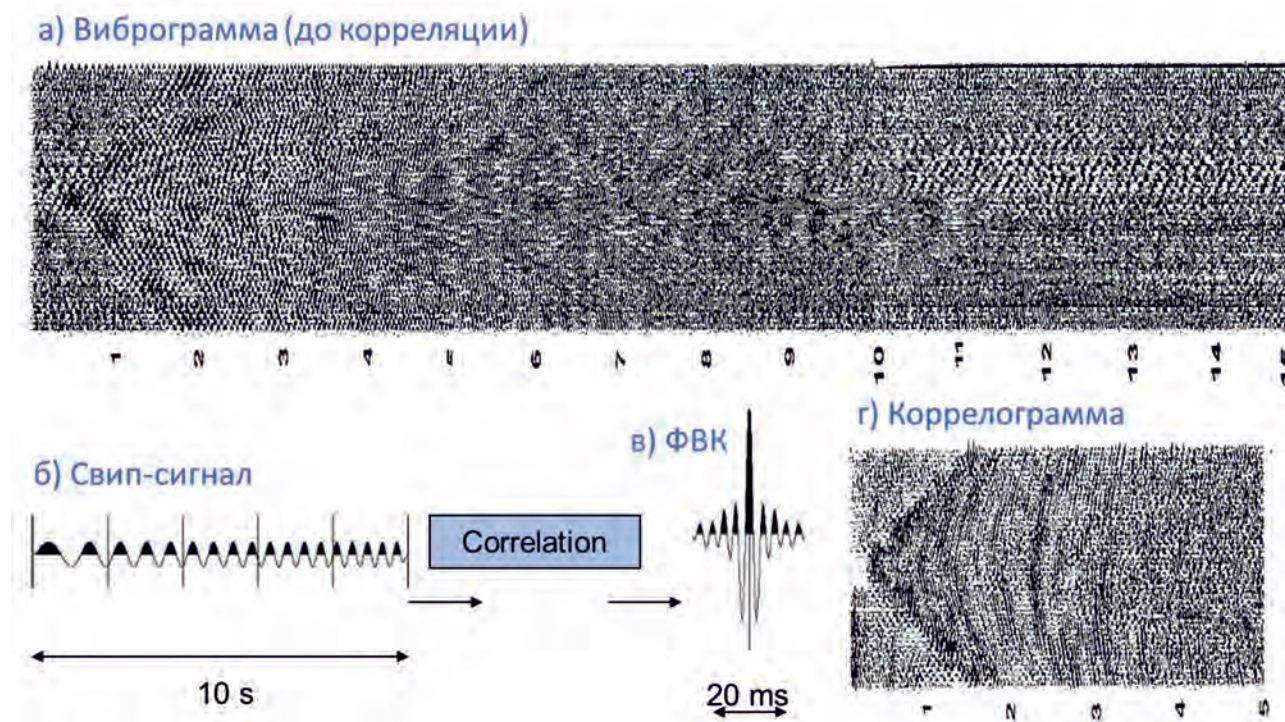
Влияние гармонических искажений на полезный сигнал

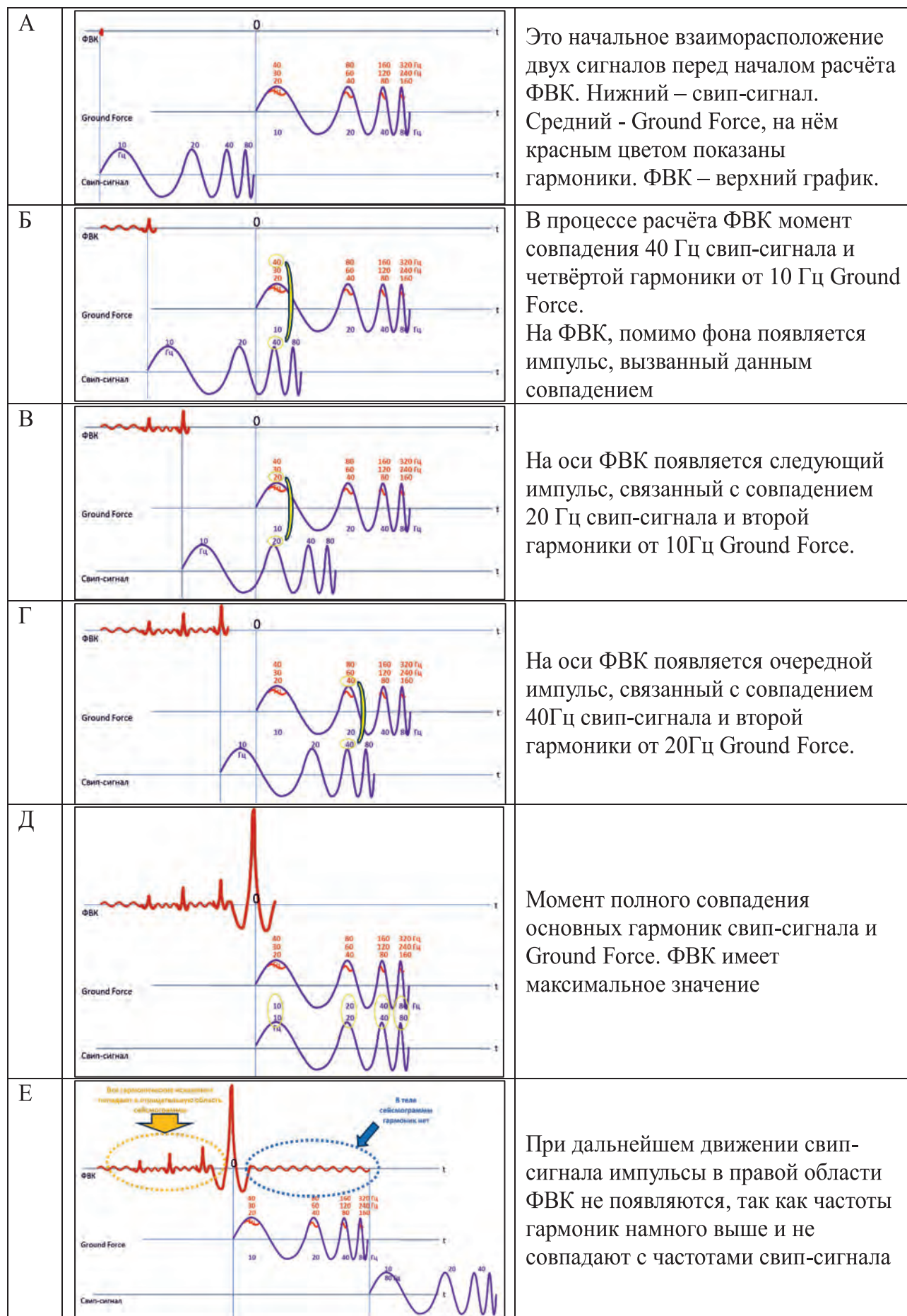
Теперь детально рассмотрим формирование ФВК, если в сигнале Ground Force присутствуют гармонические искажения. На рисунке 9 схематично изображён цикл формирования ФВК, где на средней шкале в сигнале Ground Force красным цветом показаны его гармоники (Рис. 9а). Далее, в процессе расчёта ФВК, при совпадении частот свип-сигнала с соответствующими частотами гармоник Ground Force, на ФВК появляются незначительные импульсы, отличные от основного фона (Рис. 9 б,в,г). Главный максимум ФВК образуется в момент полного совпадения основных частот обоих сигналов (Рис. 9д). При

дальнейшем расчёте ФВК, в правой её части, импульсов не образуется, из-за несовпадения низких частот свип-сигнала и высоких частот гармоник Ground Force (Рис. 9е). Таким образом, все гармонические искажения попадают в отрицательную область ФВК (читай «сейсмограммы»). В правой её части гармоник нет. Хочу сразу пояснить, что это утверждение верно только для свип-сигнала с нарастанием частоты. Если излучать обратный свип, с высоких частот в сторону низких, то все гармонические искажения будут в правой части ФВК, то есть в теле сейсмограммы. Именно по этой причине от обратного свипа геофизики отказались.

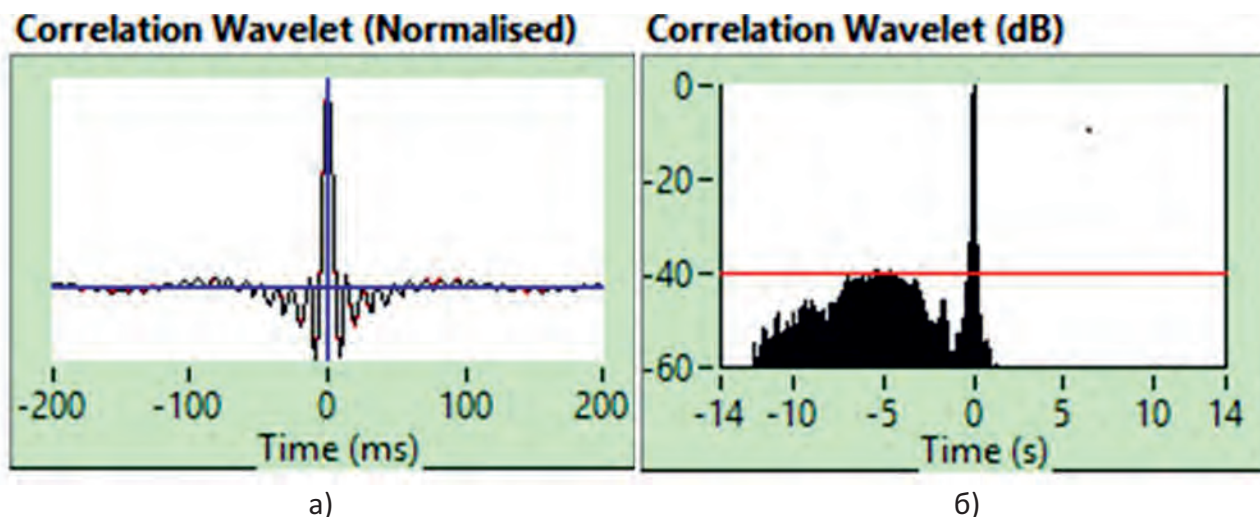
Влияние и количество гармоник используется в процессе тестирования сейсмовибраторов. На рисунке 10 показаны два графика: функция автокорреляции (ФАК), когда свип-сигнал коррелируется сам с собой (Рис.10а) и ФВК свипа с Ground Force (Рис.10б). Первый график абсолютно симметричен, так как гармонические искажения в нём отсутствуют.

▼ Рис. 8. Рисунок 8. Принцип формирования коррелограммы.





▲ Рис. 9. Формирование ФВК при присутствии гармоник в Ground Force.



▲ Рис. 10. Функции автокорреляции (а) и взаимной корреляции (б).

Его смысл только в контроле точности запуска вибратора (главный максимум должен быть строго на нуле). На втором, кроме главного максимума видны гармонические помехи на отрицательных временах. У исправного правильно отрегулированного источника уровень помех на жёстком грунте не должен превышать амплитуды выше -40дБ (-100 раз) от амплитуды главного пика. Гармоник справа нет или они меньше в 1000 и более раз.

Распределение гармонических искажений внутри коррелограммы

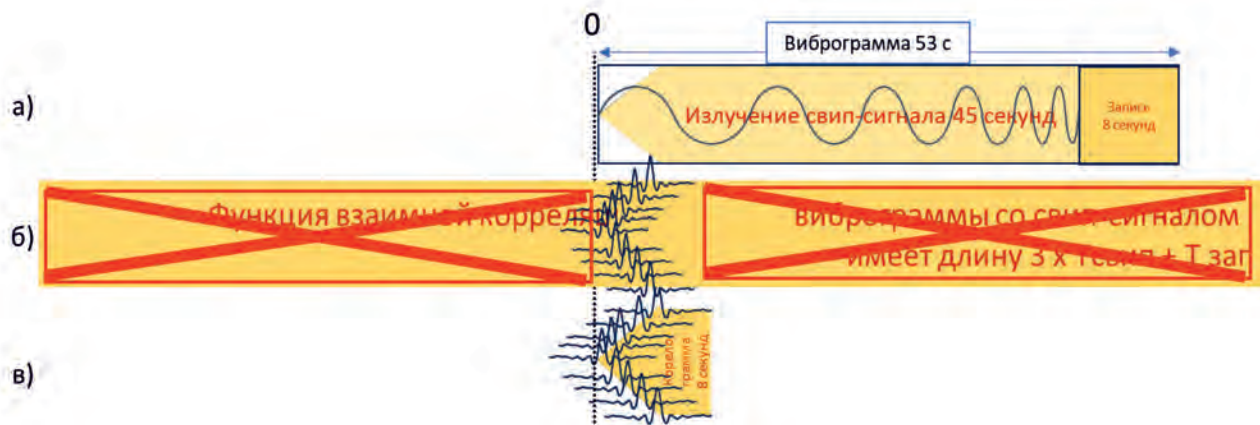
Рассмотрим процесс формирования коррелограммы (Рис. 11). Сейсмостанция регистрирует виброграмму, которая включает в себя длительность вибрации

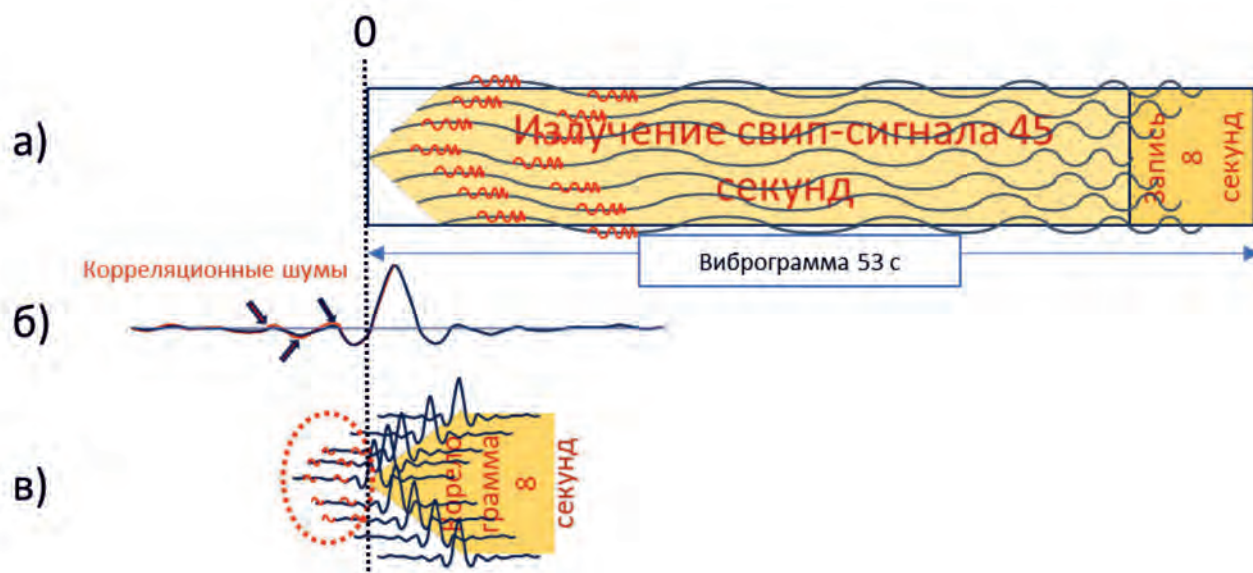
(Тсвип) плюс время записи (Тзап). Пример на рисунке приведён для свип сигнала, длительностью 45 секунд и времени записи 8 секунд (рис.11а).

Процедура взаимной корреляции, которая осуществляется непосредственно в сейсмостанции, формирует ФВК, длина которой составляет $3 \cdot T_{\text{свип}} + T_{\text{зап}}$, для нашего случая 143 секунды (рис.11б). Следующим этапом от ФВК отрезаются все отрицательные времена и все времена, больше времени записи. Остаётся отрезок ФВК, длиной 8 секунд, который называют коррелограммой (рис.11в).

Что же происходит с сигналом при наличии гармонических искажений? На рисунке 12 показан процесс формирования коррелограммы в присутствии корреляционных шумов, схематично

▼ Рис. 11. Формирование коррелограммы.





▲ Рис. 12. Формирование коррелограммы в присутствии корреляционных шумов.

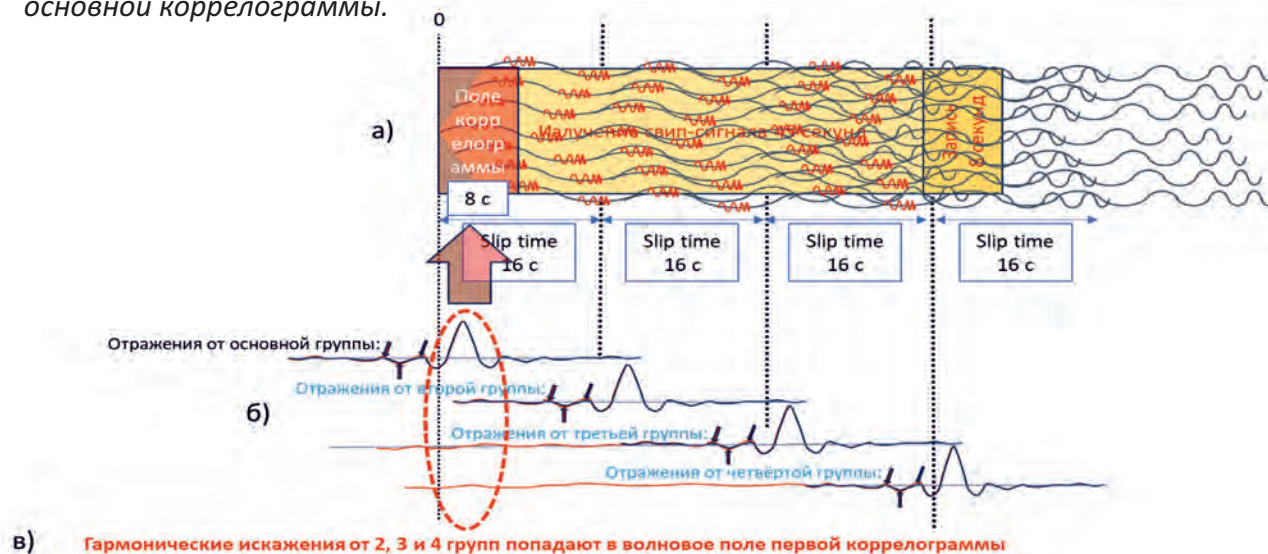
изображённых красным цветом (Рис. 12а). Как было показано выше, в каждой трассе коррелограммы, в процессе расчёта ФВК, гармоники смещаются в отрицательную область (Рис.12б). Поэтому при формировании коррелограммы они автоматически удаляются (Рис.12в). Это очень важный вывод, но... он справедлив только для методики работы с отдельной группой вибраторов!!! При работе с высокопроизводительными методиками (Slip Sweep или ISS) ситуация намного сложнее.

Гармонические искажения при использовании высокопроизводительных методик

Смоделируем виброграмму, при работе методикой Slip Sweep. На рисунке 13, в верхней части показана модель виброграммы с содержащимися в ней гармониками.

Режим Slip Sweep подразумевает непрерывную регистрацию, поэтому на волновое поле основной виброграммы, длиной 53 секунды, с периодичностью времени задержки запуска (в нашем случае Slip time = 16с), накладываются

▼ Рис. 13. Влияние гармоник последующих возбуждений на волновое поле основной коррелограммы.



отражения последующих виброграмм (Рис.13а). После процедуры взаимной корреляции (Рис.13б) образуются отражения от возбуждения 2, 3 и 4-й групп вибраторов с гармоническими искажениями в левой части. Так как обрезка левой части невозможна, в поле основной коррелограммы попадают гармонические искажения от всех четырёх коррелограмм. И хотя затем, времена больше 8 секунд удаляются из ФВК, гармоники всё равно присутствуют в теле коррелограммы.

Насколько критично наличие гармоник в волновом поле коррелограмм? В зависимости от условий возбуждения их амплитуда варьируется в весьма широких пределах и в некоторых случаях, интерферируя с соседними виброграммами, может достигать очень больших значений, сопоставимых с уровнем полезного сигнала. На рисунке 14а показан пример появления гармоник в диапазоне частот от 16 до 64 Гц, где своеобразная «полосатость» не позволяет осуществлять динамический анализ. Это не эффект «фут принта», когда полосы проходят через расстояние, равное расстоянию между профилями. Здесь шаг полос равен 1200м, в связи с интерференцией гармоник от цуга шести групп виброисточников.

Способы подавления гармонических помех

На сегодняшний день создано достаточное количество методик подавления, как зарубежных, так и российских. Перечислим некоторые из них:

1. Методика HPVA (Sercel);
2. Методика SHARP (Western Geco);
3. Методика статистического прогноза гармонических искажений (Repsol);
4. Методика адаптивного вычитания спрогнозированной помехи (ООО «Сей-

смотек»);

5. Методика «деконволюции» (ООО «Пургеофизика»);

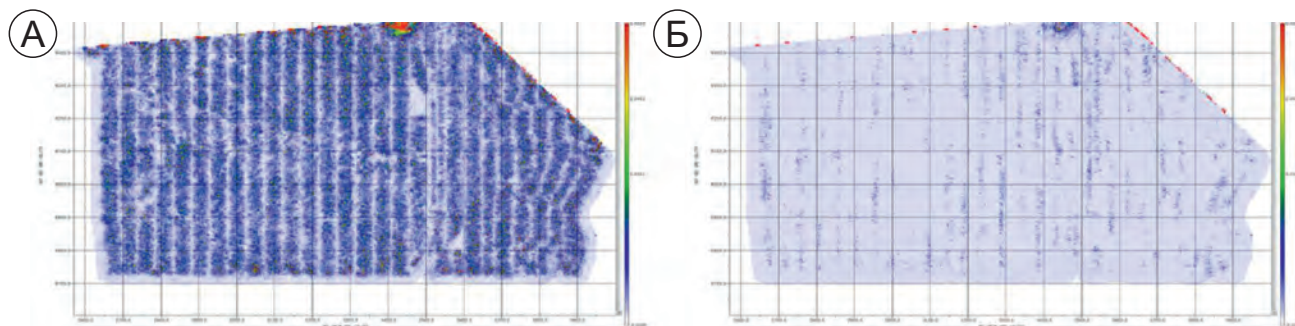
6. Метод следящей фильтрации (АО «Башнефтегеофизика»);

7. Рекурсивный метод удаления помех вторичных гармоник на основе пилотного свип-сигнала (АО «Башнефтегеофизика»)

Все зарубежные методики (п.1-3) требуют приобретения лицензии и достаточно большого объёма оперативной памяти. Российские технологии не уступают, а во многом даже превосходят зарубежные [4]. Как представитель АО «Башнефтегеофизика» вкратце расскажу о методах, применяемых в нашей компании.

Технология «Следящая фильтрация» использует полосовой фильтр по виброграммам с изменяющимися во времени граничными частотами фильтра [2]. Полоса пропускания должна полностью включать в себя времена прихода полезных отражений от всех целевых горизонтов. В результате большинство гармонических помех от соседних источников возбуждения, располагающихся в зоне подавления, гасятся. Кроме этого, следящая фильтрация давит шумы передвижения соседних групп вибраторов, промышленные помехи, треск льда и микросейсмы. После корреляции, уровень шумов и гармоник давится примерно на 90%. Метод запатентован.

Рекурсивный метод удаления помех вторичных гармоник на основе пилотного свип-сигнала. Потенциальным преимуществом методики является возможность целенаправленного подавления отдельных гармоник разного порядка и работы с ними по отдельности. Метод осуществляет выделение гармоник через взаимную корреляцию виброграмм с соответствующим свипом для каждого порядка. Затем, выделенные



▲ Рис. 14. Карта RMS амплитуд до (а) и после (б) шумоподавления Slip Time=16с по кубу ближних удалений (1500м) в частотном диапазоне 30-60 Гц.

гармоники поочерёдно вычитаются из первичной коррелограммы. Результат шумоподавления представлен на рисунке 14б.

Заключение

Любые вибрационные данные подвержены влиянию гармонических искажений. При стандартных методиках проведения полевых работ искажения не приносят негативного влияния на качество данных, так как соответствующие помехи находятся в отрицательных временах каждого из возбуждений;

Высокопроизводительная методика Slip-Sweep позволяет получить материал высокого качества, однако подвержена негативному влиянию помех (работа и движение вибрационных установок, влияние гармонических искажений пилотного свипа);

Минимизировать влияние гармонических искажений на данных Slip-Sweep возможно на этапе планирования полевых работ и опытно-методических работ, меняя параметры длины свип-сигнала;

Необходимо использование специальных подходов для подавления помех, вызванных вторичными гармониками, реализуя методики, в том числе разработанные в АО «Башнефтегеофизика».

Литература

1. Гафаров Р.М. Slip-sweep - метод высокопроизводительной сейсморазведки без потери качества получаемых данных в условиях центральной части России // Приборы и системы разведочной геофизики. 2012. № 1. С. 62-66
2. Гафаров Р.М. Применение следящей фильтрации при обработке данных Slip-sweep // Геофизика. 2012. № 4. С. 47-53
3. Ягудин И.Р., Гафаров Р.М., Сираев И.А., Ахтямов Р.А. Влияние нелинейных искажений на качество полевых данных в вибрационной сейсморазведке // Геофизика. 2022. № 4. С. 58-63
4. Акуленко А.С., Гафаров Р.М., Сираев И.А. Анализ эффективности технологий подавления эффектов наложения гармонических искажений, возникающих при выполнении полевых сейсморазведочных работ // Приборы и системы разведочной геофизики. 2023. № 01(76). С. 15-27