



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАРМОНИК АМПЛИТУДНО И НЕЛИНЕЙНО ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

**М.С. Денисов, А.А. Зыков**

ООО «ГЕОЛАБ», 119071, Москва, ул. Орджоникидзе, 12/4, Россия,

*e-mail: denisovms@gmail.com*

В вибросейсмических данных почти всегда присутствуют нелинейные искажения сигнала, называемые гармониками. Предложенная ранее методика разделения сигнала и его гармоник позволяет улучшить качество исходного материала, а также получить дополнительную информацию о геологическом строении разреза. Одним из ограничений методики является ее изначальная разработка под модель линейно частотно-модулированного сигнала. Предлагается новый способ моделирования гармоник, позволяющий работать с сигналами как амплитудной, так и нелинейной частотой модуляции.

*Вибросейс, гармоника, спектр импульса, модуляция*

## MODELING OF HARMONICS OF AMPLITUDE AND NONLINEAR FREQUENCY-MODULATED SIGNALS

**M.S. Denisov, A.A. Zykov**

GEOLAB Ltd, Ordzhonikidze Str., 12/4, Moscow, 119071, Russia,

*e-mail: denisovms@gmail.com*

In vibroseismic data, nonlinear signal distortions called harmonics are usually present. The previously proposed method of separating the signal and its harmonics makes it possible to improve the quality of the initial data, as well as to obtain additional information about the geological structure of the earth interior. One of the limitations of the proposed methodology is its initial development for linear frequency-modulated signals. A new method of prediction of harmonics that allows non-linear frequency modulation as well as amplitude variation is proposed.

*Vibroseis, harmonics, wavelet spectrum, modulation*

## ВВЕДЕНИЕ

Возбуждению сигналов в вибрационной сейсморазведке всегда сопутствует появление кратных частот, которые также принято называть гармониками. В зависимости от конструкции источника колебаний и условий взаимодействия плиты с грунтом они могут иметь большую или меньшую интенсивность. Исследование природы гармоник представляет собой задачу повышенной сложности, о чем свидетельствует хотя бы тот факт, что соответствующие споры не утихают уже не первое десятилетие.

Начало теоретических и экспериментальных исследований, относящихся к гармоническим искажениям сигналов в невзрывной сейсморазведке, восходит ко второй половине прошлого столетия, когда появились первые результаты работ с вибрационными источниками колебаний. Анализ волновых картин указывал на безусловное наличие нелинейных составляющих.

В геофизической литературе устоялось мнение (см., например, [Akhondi-Asl, Vermeer, 2015]), что четные гармоники связаны с нелинейными эффектами на контакте плиты с поверхностью земли, а именно сложным характером взаимодействия рабочей плиты излучателя с грунтом при передаче ему переменных силовых нагрузок и характером поведения грунта при разнонаправленных нагрузках на среду. В то же время нечетные гармоники обусловлены особенностями самой конструкции излучателей. Плита со штоком, поршнем и гидроцилиндром (реактивная масса) образуют единую реактивную механическую систему, приводимую в движение внутренней переменной по величине силой. В результате поршень с плитой движутся в одну сторону, а реактивная масса – в другую. При этом, если последняя может свободно перемещаться вверх и вниз от центрального положения, то поршень с плитой ограничены в своем движении сопротивлением грунта, так как вибратор, как правило, работает в режиме небольших (до 1.5–2.0 кг/см<sup>2</sup>) деформаций грунтового полупространства. При расчете конструкции вибраторов в качестве одного из параметров задается величина взаимного перемещения поршня и гидроцилиндра («ход поршня») на самой низкой рабочей частоте. В связи с тем, что ход поршня с ростом частоты уменьшается обратно пропорционально ее квадрату, он выбирается значительным для того, чтобы и на высоких частотах взаимные перемещения поршня и гидроцилиндра имели заметные значения. Для многих сейсмических вибраторов этот параметр выбирается равным 4–5 см, и во всех случаях он превышает предел упругих деформаций грунта. В результате инерционная масса свободно смещается вверх и вниз, а поршень с плитой ограничены в своем движении, что и приводит к искажению формы возбуждаемых колебаний, которое может рассматриваться как осложнение основного силового воздействия гармониками. Их уровень определяется ходом поршня и компрессионными характеристиками грунта. С увеличением частоты возбуждаемых колебаний амплитуды перемещения плиты уменьшаются и, начиная с какой-то частоты, вибратор начинает работать в режиме упругих деформаций пород. Это является одной из причин снижения уровня гармоник с ростом частоты [Теория ..., 1998].

Также известны результаты опытно-методических экспериментов, направленных на изучение природы и особенностей гармоник. На наш взгляд, наиболее полной является работа [Ведерников и др., 2001], в которой приводится большое число иллюстраций как по монохроматическим воздействиям, так и по свип-сигналам, полученным в различных условиях возбуждения и приема колебаний. Показано, что при малых деформациях грунта, которые имеют место в начале работы вибратора при излучении низкочастотных компонент свипа, эффект гармонических искажений почти отсутствует. Однако при выходе на режим максимальной мощности излучения регистрируемые смещения грунта имеют форму, характерную для неупругой деформации.

Эффект неупругого взаимодействия виброисточника с грунтом также описывается в работах [Васильев и др., 1969; Машинский, 1987], где утверждается, что при вибровоздействии даже в случае так называемых «малых деформаций» хотя остаточные деформации отсутствуют, но воздействие на среду оказывается неупругим. Кроме того, «исследование даже простых по строению кристаллов показывает наличие в них заметных неупругих эффектов при действии не слишком больших напряжений и деформаций». Известны экспериментальные подтверждения отклонения колебаний, вызванных виброисточником, от закона Гука [Геза и др., 2004]. Понятно, что применяемое на практике уплотнение грунта, проводимое перед началом вибрационной сейсморазведки, позволяет ослабить явления неупругости, но не избавиться от них. Работа [Авербах и др., 2008] содержит достаточно полный библиографический список русскоязычных и англоязычных публикаций по теме неупругого воздействия виброисточника на грунт. Известны и альтернативные объяснения наблюдаемых искажений формы

сигнала, например, [Циммерман, 2004]. Более подробный обзор литературы можно найти в книге [Жуков, Шнеерсон, 2000].

Зарубежной литературе, посвященной гармоникам, можно было бы посвятить отдельную обзорную работу, однако ограничимся указанием лишь на две недавние публикации, содержащие достаточно полный обзор соответствующих источников [Gürel, 2021; Liu et al., 2022].

Здесь мы не имеем нужды более подробно останавливаться на вопросе о природе гармоник, так как нас не будет интересовать причина их появления. Алгоритм моделирования, который будет разработан ниже, основан на пересчете свип-сигнала основного тона в его гармоники и не зависит от природы последних. На основании таких моделей в дальнейшем мы получим возможность разработки алгоритма как подавления гармоник, так и использования их для расширения спектра сигнала.

Использованию гармоник для решения практических задач обработки и интерпретации вибросейсмических данных были посвящены наши предыдущие исследования, библиографические ссылки на которые можно найти в статье [Денисов, Зыков, 2022]. В том числе, был разработан алгоритм, позволяющий отделить сигнал от гармоник, а также разделить волновые поля гармоник различного порядка. Алгоритм получил название оптимизационной рекурсивной фильтрации (ОРФ). Однако во всех этих работах рассуждения строились на том, что при возбуждении сигнала используется линейная частотная модуляция (ЛЧМ), что позволяло получать для гармоник компактные аналитические выражения. Как показывает практика, зачастую записанный реальный вибрационный сигнал довольно сильно отличается от желаемого [Жуков, 2023]. Помимо этого, на сегодняшний день активно разрабатываются методики, в которых исходный сигнал нелинейно частотно-модулированный (НЛЧМ) [Жуков, Шнеерсон, 2000]. Почти всегда реальный вибрационный импульс подвергается амплитудной модуляции хотя бы потому, что к нему применяется сглаживание на краях (так называемые конусы). Поэтому для дальнейшего развития нашего исследования в данной работе предлагается способ моделирования гармоник сигналов, характеризуемых одновременно как амплитудной, так и нелинейной частотной модуляцией (АНЛЧМ).

Проводя настоящее исследование, мы, в первую очередь, имели в виду развитие алгоритма ОРФ с целью оснащения его возможностью обработки не только ЛЧМ, но и АНЛЧМ сигналов. Этому будет посвящена наша следующая статья. В то же время область применимости и практическое значение полученных здесь результатов этим не исчерпывается. Способ расчета или прогнозирования гармоник свип-сигналов с учетом возможной их амплитудной и нелинейной фазовой модуляции может позволить более достоверно контролировать уровень нелинейных искажений вибрационного воздействия, а также предложить более надежные критерии качества полевого материала. Кроме того, результаты могут оказаться полезными при тестировании алгоритмов устранения гармонических шумов.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть в какой-то момент времени вибратор возбуждает мгновенную частоту, равную, например, 50 Гц. Тогда в глубь среды в этот же момент времени также распространяются волны с частотами 100 Гц (2-я гармоника), 150 Гц (3-я гармоника) и т. д. Следует указать способ расчета гармоник любого порядка по произвольному вибрационному сигналу, заданному в виде некоторой функции времени.

## МОДЕЛЬ

Введенная ранее модель дискретного вибросейсмического сигнала  $q(t)$  [Денисов, Егоров, 2019] записывается в виде

$$q(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) * q_m(t), \quad (1)$$

где  $q_m(t)$  –  $m$ -я гармоника,  $a_m(t)$  – фильтры,  $M$  – общее число гармоник,  $t$  – индекс дискретного времени. Звездочка обозначает свертку.

Фактически, выражение (1) описывает разложение сигнала  $q(t)$  по системе базисных функций, в роли которых выступают гармоники  $q_m(t)$ . Функцию  $q_1(t)$  (она же – теоретический или опорный свип) называем сигналом основного тона или 1-й гармоникой, при этом  $a_1(t) \equiv \delta(t)$  – дискретная дельта функция.

Все сигналы, с которыми приходится иметь дело при решении практических задач, являются так называемыми квазигармоническими функциями, т. е. описываются формулой  $g(t) \sin(tf(t))$ , где  $f(t)$  – мгновенная частота,  $g(t)$  – огибающая. Помимо ЛЧМ, существует много вариантов НЛЧМ сигналов (подробно о них можно почитать в работе [Теория..., 1998]), например, логарифмические и степенные.

Эффект амплитудной модуляции может быть связан не только со сглаживанием сигнала на краях, но и с усилением тех или иных его частотных компонент [Жуков и др., 2021]. В таком случае имеем АНЛЧМ сигнал.

В некоторый момент времени вибрационная установка возбуждает квазигармонический сигнал, имеющий свою амплитуду, и эту же амплитуду наследуют его гармоники. Это понятный и логичный принцип. Если сигнал основного тона на какой-то частоте интенсивен, то интенсивными окажутся и гармоники. И наоборот, если он ослаблен (например, из-за использования конусного сглаживания), то гармоники будут слабее. Разумеется, на практике этот принцип усложняется, и отношение амплитуды гармоники к амплитуде порождающего ее сигнала основного тона оказывается частотно-зависимой функцией. Такая зависимость бывает обусловлена свойствами среды, условиями контакта плиты с грунтом, а также конструкцией самого вибратора. Тем не менее, эффект переноса амплитуды колебаний необходимо учесть при построении алгоритма прогнозирования гармоник.

### АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ГАРМОНИК

К решению поставленной задачи можно подойти как минимум тремя различными способами.

1. Мгновенная частота квазигармонического сигнала  $g(t) \sin(tf(t))$  равна  $f(t)$ , а его мгновенная фаза  $\psi(t)$  определяется производной мгновенной частоты:  $\psi(t) = \int \frac{\partial f(t)}{\partial t} dt$  [Гоноровский, 1986]. По определению, гармоника имеет кратную мгновенную частоту  $mf(t)$ , следовательно, она также имеет и кратную мгновенную фазу  $m\psi(t)$ . Поэтому для получения гармоники нам надо указать способ перехода от функции  $g(t) \sin(tf(t))$  к функции  $g(t) \sin(tm f(t))$ . Иначе говоря, корректно преобразовав только мгновенную частоту, мы получим сигнал также и с требуемой фазовой характеристикой.

Если частота задана в виде функциональной зависимости, что имеет место, например, в случае упомянутых выше линейной, логарифмической и степенной модуляций, то получение  $m$ -й гармоники не вызывает затруднений:

$$q_m(t) = g(t) \sin(tm f(t)). \quad (2)$$

2. Если в процессе полевых наблюдений производится регистрация толкающего усилия (в англоязычной литературе – ground force), то на такой записи сигнал основного тона будет наблюдаться на фоне гармоник. Отделить основной тон от гармоник, а также гармоники разных порядков друг от друга, можно при помощи так называемой следящей фильтрации, т. е. полосовой фильтрации с нестационарным оператором, настроенным на выделение заданного узкого частотного диапазона в каждый момент времени (такой прием используют, например, авторы работы [Ягудин и др., 2022]). Тогда не требуется прилагать специальных усилий с целью соблюдения амплитудных соотношений гармоник и основного сигнала.

3. Если огибающая и мгновенная частота в явном виде не заданы, а также если не производилась запись толкающего усилия, то можно воспользоваться тригонометрическими формулами, позволяющими получать функцию кратного аргумента.

Пусть в момент времени  $t = \hat{t}$  имеем мгновенную частоту  $\hat{f} = f(\hat{t})$ . В некоторой локальной  $\varepsilon$ -окрестности  $t \in (\hat{t} - \varepsilon, \hat{t} + \varepsilon)$  основной вибросигнал описывается функцией  $g(\hat{t}) \sin(t\hat{f})$ , и требуется указать способ его преобразования в функцию  $g(\hat{t}) \sin(tm\hat{f})$ .

Воспользуемся формулами понижения степени [Корн, Корн, 1974]

$$\sin^2 x = \frac{1 - \cos 2x}{2} \quad (3)$$

и

$$\sin^3 x = \frac{3 \sin x - \sin 3x}{4}. \quad (4)$$

Для динамически корректного прогнозирования гармоник также должны быть учтены вариации амплитуды, определяемые огибающей сигнала. В самом деле, с каким амплитудным коэффициентом наблюдается сигнал основного тона, с таким же коэффициентом должны прогнозироваться все его гармоники. Поэтому необходимо ввести в последние выражения множитель  $d$ , полагая, что вместо сигнала  $\sin x$  имеется сигнал  $d \sin x$ . Учет множителя в явном виде важен потому, что выписанные формулы преобразований оказываются нелинейными в смысле определения нелинейного преобразования  $H : H\{d \sin x\} \neq dH\{\sin x\}$ .

Умножив левую и правую части формулы (3) на  $d^2$ , имеем

$$(d \sin x)^2 = d^2 \frac{1 - \cos 2x}{2},$$

откуда приходим к

$$\cos 2x = 1 - \frac{2}{d^2} (d \sin x)^2.$$

Амплитуда сигнала основного тона равна  $d$ , поэтому в результате преобразования надо получить колебание  $d \cos 2x$ , т. е. требуется умножить левую и правую части последнего равенства на  $d$ :

$$d \cos 2x = d - \frac{2}{d} (d \sin x)^2. \quad (5)$$

Так как с учетом введенных обозначений  $q_1(\hat{t}) = d \sin x$  и  $q_2(\hat{t}) = d \sin 2x$ , то из равенства (5) следует

$$\frac{\partial q_2(t)}{\partial t} = \frac{g(t)}{2} - \frac{q_1^2(t)}{g(t)}.$$

Для квазигармонического сигнала, фигурирующего в левой части, дифференцирование локально сводится к повороту его фазы на величину  $\pi/2$  (синус преобразуется в косинус). Поэтому приходим к окончательному выражению

$$q_2(t) = \left( \frac{g(t)}{2} - \frac{q_1^2(t)}{g(t)} \right) * l(t), \quad (6)$$

где  $l(t)$  – оператор поворота фазы на  $-\pi/2$ , т. е. он имеет частотную характеристику

$$L(\omega) = \exp(-j \frac{\pi}{2}),$$

где  $j = \sqrt{-1}$ .

Вычисления, производимые в соответствии с (6), подразумевают возведение в квадрат каждого текущего отсчета сигнала основного тона  $q_1(t)$ , деление результата на  $g(t)$  с последующим вычитанием из  $g(t)/2$ . Затем к полученной функции применяется фильтрация с оператором  $l(t)$ . В результате получим колебание удвоенной частоты с нужной амплитудой.

При помощи аналогичных рассуждений несложно перейти от (4) к формуле расчета 3-й гармоники:

$$q_3(t) = 3q_1(t) - \frac{4}{g^2(t)} q_1^3(t). \quad (7)$$

Первый способ получения гармоник может применяться, когда мгновенная частота управляющего сигнала, подаваемого на вибрационную установку, задана в виде функции  $f(t)$ . Функция может быть как линейной, так и нелинейной. Важно, что сама установка не должна порождать отклонений от требуемой характеристики. Ниже, рассматривая реальные свип-сигналы, мы приведем пример, когда такие отклонения оказываются весьма существенными.

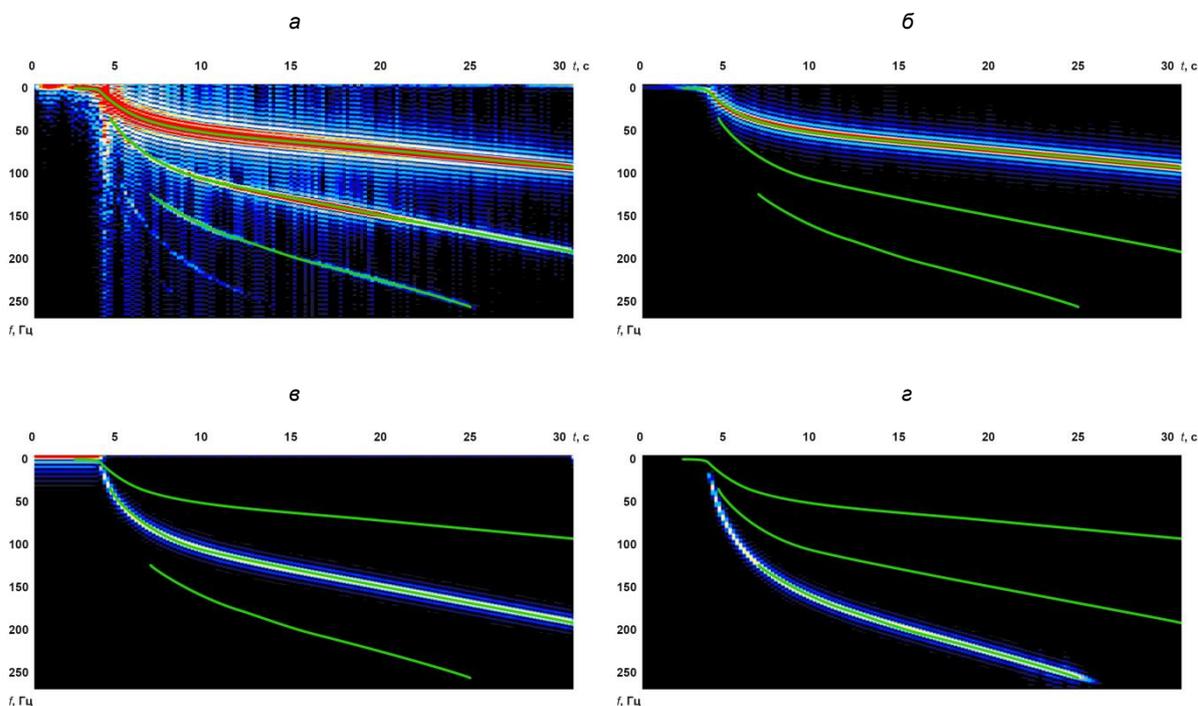
Второй способ требует наличия достоверной записи сигнала толкающего усилия, что далеко не всегда имеет место в условиях проведения полевых работ. Во-первых, такая запись может вообще не проводиться. Во-вторых, на записи толкающего усилия гармоники могут быть искажены. Искажения бывают обусловлены провалами в амплитудном спектре гармоник, а также, что более существенно, применением аналоговой антиалейсинговой фильтрации, удаляющей высокочастотные компоненты. К примеру, если диапазон частот возбуждения основного тона выбран 5–90 Гц, то верхняя частота 2-й гармоники равна 180 Гц, а 3-й – 270 Гц. Так как считается, что выше 90 Гц нет полезной информации, частота антиалейсингового полосового фильтра выбирается из этих соображений. В-третьих, селективные свойства следящего фильтра могут оказаться неудовлетворительными, в особенности, в области низких частот.

Третий способ представляется наиболее универсальным. Он может применяться как по сигналу основного тона, выделенного из записи толкающего усилия, так и по заданному тем или иным образом управляющему сигналу. На практике приходится сталкиваться с тем, что импульс задан как управляющий сигнал, причем задан в виде произвольной функции, при этом сигнал толкающего усилия не регистрируется. Именно этот способ мы предлагаем использовать при обработке вибросейсмических данных.

### ПРИМЕР ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГАРМОНИК

Работоспособность алгоритма прогнозирования гармоник демонстрируется с использованием реального сигнала толкающего усилия, который здесь не изображается ввиду хорошо известных трудностей, связанных с визуализацией протяженных быстроосциллирующих функций. Вместо этого показан результат частотно-временного разложения (также называемого спектрально-временным анализом – СВАН), на котором сигнал основного тона и его гармоники разделяются и имеют ярко выраженные изолированные траектории. На рисунке 1, а показана СВАН-колонка исходного толкающего усилия. Наряду с основным тоном на ней выделяются гармоники 2-го, 3-го и 4-го порядков. Были прослежены траектории сигнала и гармоник до 3-го порядка включительно, в результате чего получены зеленые кривые, наложенные на частотно-временную картину на рис. 1. Очевидно, что траектории нелинейные, следовательно, мы имеем дело с НЛЧМ или АНЛЧМ сигналом.

Сигнал основного тона был выделен следящей фильтрацией (рис. 1, б), после чего он поступил на вход преобразований (6) и (7). Результат прогнозирования 2-й гармоники представлен на рис. 1, в, а 3-й – на рис. 1, г. На основании почти идеального совпадения траекторий прогнозных сигналов с требуемыми траекториями (зеленые кривые), мы делаем вывод о высоком качестве спрогнозированных гармоник. Помимо этого, о хорошей точности прогноза свидетельствует то, что на СВАН колонках на рис. 1, в, г не наблюдается артефактов или паразитных частот.

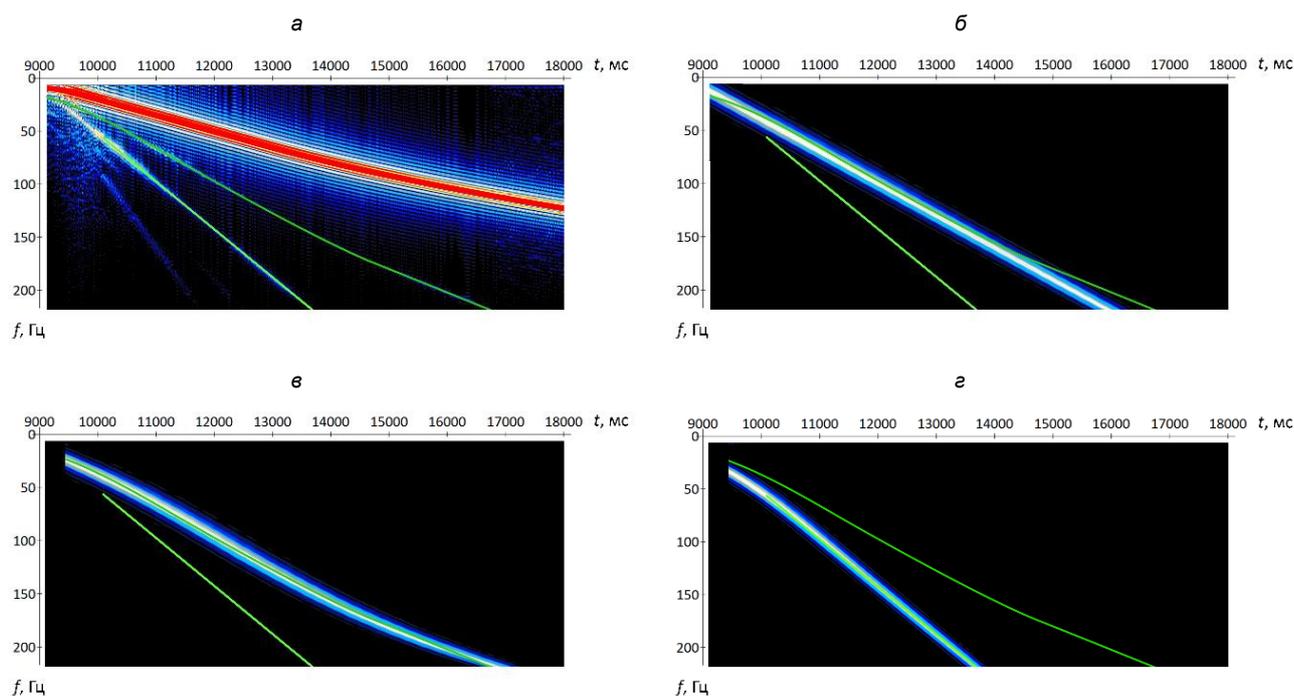


**Рис. 1.** СВАН-колонки: а – исходной записи сигнала толкающего усилия; б – сигнала основного тона, выделенного при помощи следящей фильтрации; в – 2-й гармоники, посчитанной при помощи формулы (6); г – 3-й гармоники, посчитанной при помощи формулы (7). Зеленые кривые соответствуют результатам прослеживания по СВАН-колонке исходной записи траекторий основного сигнала и гармоник 2-го и 3-го порядков

Другая запись реального толкающего усилия демонстрируется на рис. 2, а. При проведении полевых работ было заявлено, что используется ЛЧМ сигнал. Поэтому на СВАН-колонке сигнала основного тона мы ожидаем увидеть прямолинейную траекторию. Как следует из рисунка, в пределах значительного частотного диапазона траектория и в самом деле близка к линейной. Однако в области низких и высоких частот наблюдаются значительные отклонения. Если бы не было средств контроля работы вибрационной установки в виде записи толкающего усилия (а так бывает далеко не всегда), прогноз гармоник осуществлялся бы по формуле (2), что привело бы к значительным погрешностям (рис. 2, б).

Также из рис. 2, а следует, что 2-я гармоника регистрируется ненадежно, имеются провалы в ее амплитудном спектре, что делает невозможным прослеживание ее траектории на СВАН колонке. Кроме того, на записи толкающего усилия отрезаны высокочастотные компоненты, поэтому при желании использовать результат регистрации гармоник будет утеряна, в том числе, их высокочастотная составляющая.

Указанные проблемы снимаются, если прогнозировать гармоники на основании выражений (6) и (7). Результаты показаны соответственно на рис. 2, в (2-я гармоника) и рис. 2, г (3-я гармоника). Наблюдается почти идеальное совпадение траекторий спрогнозированных гармоник с прослеженными по реальным гармоникам траекториями.



**Рис. 2.** СВАН-колонки: а – исходной записи сигнала толкающего усилия; б – 2-й гармоники, спрогнозированной при помощи формулы (2); в – 2-й гармоники, посчитанной при помощи формулы (6); г – 3-й гармоники, посчитанной при помощи формулы (7). Зеленые кривые соответствуют результатам прослеживания по СВАН-колонке исходной записи траекторий основного сигнала и гармоник 2-го и 3-го порядков

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан способ моделирования гармоник амплитудно и нелинейно частотно-модулированных сигналов, который позволит расширить область применимости предложенных нами ранее адаптивных алгоритмов разделения сигнала и гармоник. Использовать результаты исследования можно и при решении иных геофизических задач, в том числе, при контроле уровня нелинейных искажений

вибрационного воздействия, оценивании качества полевого материала и тестировании алгоритмов устранения гармонических шумов.

Авторы благодарят Zhouhong Wei и ООО «НПП Спецгеофизика» за предоставленные полевые записи толкающих усилий вибрационных установок и за разрешение на демонстрацию полученных результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.** Диагностика акустических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях // Акустический журнал. – 2008. – № 54 (4). – С. 607–620.
- Васильев Ю.И., Иванова Л.А., Щербо М.Н.** Измерение напряжений и деформаций в грунте при распространении взрывных волн // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1969. – № 1. – С. 21–37.
- Ведерников Г.В., Максимов Л.А., Жарков А.В.** Исследование кратных гармоник вибросигналов // Геофизика. Спецвыпуск к 30-летию «Сибнефтегеофизики». – 2001. – С. 33–38.
- Геза Н.И., Егоров Г.В., Юшин В.И.** Особенности напряженного состояния рыхлой среды, подвергаемой пульсирующей нагрузке // Труды международной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». – Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2004. – С. 340–347.
- Гоноровский И.С.** Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
- Денисов М.С., Егоров А.А.** Построение модели вибросейсмического сигнала, осложненного гармониками // Геофизические технологии. – 2019. – № 1. – С. 72–83, doi: 10.18303/2619-1563-2019-1-72.
- Денисов М.С., Зыков А.А.** Исследование особенностей реальных вибросейсмических сигналов, осложненных гармоническими помехами // Геофизические технологии. – 2022. – № 1. – С. 30–48, doi: 10.18303/2619-1563-2022-1-30.
- Жуков А.П.** Искажения вибрационного сигнала, обусловленные земной толщей // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2023. – № 3 (78). – С. 76–84.
- Жуков А.П., Шнеерсон М.Б.** Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки. – М.: Недра, 2000. – 100 с.
- Жуков А.П., Коротков И.П., Тищенко А.И.** Адаптивные технологии вибрационной сейсморазведки. Часть I // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2021. – № 1 (68). – С. 32–47.
- Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
- Машинский Э.И.** Физическое обоснование неупругости пород при распространении сейсмических волн // Методы расширения частотного диапазона вибросейсмических колебаний: Сб. научных трудов. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1987. – С. 113–125.
- Теория** и практика наземной невзрывной сейсморазведки / Под ред. М.Б. Шнеерсона. – М.: Недра, 1998. – 527 с.
- Циммерман В.В.** Качество вибрационного излучения // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2004. – № 9 (3). – С. 19–21.
- 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.
- Akhondi-Asl H., Vermeer P.L.** Vibrator harmonics-noise or signal // 77th EAGE Conference and Exhibition. Expanded Abstracts. – 2015, doi: 10.3997/2214-4609.201413436.
- Gürelİ O.** Use of vibrator harmonics as a sweep signal // Journal of Seismic Exploration. – 2021. – Vol. 30 (6). – P. 505–528.

**Liu D., Li X., Wang W., Wang X., Shi Z., Chen W.** Eliminating harmonic noise in vibroseis data through sparsity-promoted waveform modeling // *Geophysics*. – 2022. – Vol. 87 (3) – P. V183–V191, doi: 10.1190/geo2021-0448.1.

## REFERENCES

**Akhondi-Asl H., Vermeer P.L.** Vibrator harmonics-noise or signal // 77th EAGE Conference and Exhibition. Expanded Abstracts. – 2015, doi: 10.3997/2214-4609.201413436.

**Averbakh V.S., Lebedev A.V., Maryshev A.P., Talanov V.I.** Diagnostics of the acoustic properties of unconsolidated media under natural conditions // *Acoustic Journal*. – 2008. – Vol. 54 (4). – P. 607–620.

**Denisov M.S., Egorov A.A.** Constructing a model of vibroseis signal complicated by harmonics // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. – 2019. – Vol. 1. – P. 72–83, doi: 10.18303/2619-1563-2019-1-72.

**Denisov M.S., Zыков A.A.** Study of properties of real Vibroseis signals contaminated by harmonic noise // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. – 2022. – Vol. 1. – P. 30–48, doi: 10.18303/2619-1563-2022-1-30.

**Geza N.I., Egorov G.V., Yushin V.I.** Features of the stressed state of a loose medium subjected to a pulsating load // Proceedings of the international conference “Geodynamics and stress state of the Earth’s interior”, – Novosibirsk: Publishing House IGD SO RAN. – 2004. – P. 340–347.

**Gonorovsky I.S.** Radio circuits and signals. – Radio and Communication, Moscow, 1986. – 512 p.

**Gürelı O.** Use of vibrator harmonics as a sweep signal // *Journal of seismic exploration*. – 2021. – Vol. 30 (6). – P. 505–528.

**Korn G., Korn T.** Handbook of mathematics. – Nauka, Moscow, 1974. – 832 p.

**Liu D., Li X., Wang W., Wang X., Shi Z., Chen W.** Eliminating harmonic noise in vibroseis data through sparsity-promoted waveform modeling // *Geophysics*. – 2022. – Vol. 87 (3) – P. V183–V191, doi: 10.1190/geo2021-0448.1.

**Mashinsky E.I.** Physical justification of the inelasticity of rocks during the propagation of seismic waves // *Methods for expanding the frequency range of vibroseismic oscillations: Collection of scientific works*. – Institute of Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Novosibirsk, 1987. – P. 113–125.

**Theory and practice of ground-based non-explosive seismic exploration / Ed. M.B. Schneerson.** – Nedra, Moscow, 1998. – 527 p.

**Vasiliev Yu.I., Ivanova L.A., Shcherbo M.N.** Measurement of stresses and deformations in the soil during the propagation of blast waves // *Izvestiya of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth*. – 1969. – Vol. 1. – P. 21–37.

**Vedernikov G.V., Maksimov L.A., Zharkov A.V.** Study of multiple harmonics of vibroseis signals // *Geofizika*. – Special Issue to 30th Anniversary of “Sibneftegeofizika”. – 2001. – P. 33–38.

**Yagudin I.R., Gafarov R.M., Siraev I.A., Akhtyamov R.A.** Study of nonlinear transformations on the quality of field data in vibration seismic exploration // *Geofizika*. – 2022. – Vol. 4. – P. 58–63.

**Zhukov A.P.** Distortions of the vibration signal caused by the Earth's strata // *Instruments and Systems of Exploration Geophysics*. – 2023. – Vol. 3 (78). – P. 76–84.

**Zhukov A.P., Schneerson M.B.** Adaptive and nonlinear methods of vibration seismic exploration. – Nedra, Moscow, 2000. – 100 p.

**Zhukov A.P., Korotkov I.P., Tishchenko A.I.** Adaptive technologies of vibration seismic exploration. Part I // *Instruments and systems of exploration geophysics*. – 2021. – Vol. 1 (68). – P. 32-47.

**Zimmerman V.V.** Quality of vibration radiation // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. – 2004. – Vol. 9 (3). – P. 19–21.

#### **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*ДЕНИСОВ Михаил Сергеевич* – доктор физико-математических наук, директор по науке ООО «ГЕОЛАБ». Основные научные интересы: разработка алгоритмов обработки данных сейсморазведки.

*ЗЫКОВ Андрей Александрович* – геофизик ООО «ГЕОЛАБ», аспирант ИФЗ РАН. Основные научные интересы: обработка данных сейсморазведки, инженерная геофизика.

*Статья поступила в редакцию 6 октября 2023 г.,  
принята к публикации 29 ноября 2023 г.*