

Велосиметр СПВ-ЗК с улучшенными характеристиками

- Марченков А.Ю., МГУ, г. Москва,
- Мишин А.В., Семейки Н.П., Трушков В.Н., ООО «Логические системы», г. Казань

Малогабаритный велосиметр СПВ-Зк представляет собой результат дальнейшего развития ёмкостных сейсмометров с активными обратными связями. Механическая конструкция прибора выполнена по современным технологиям, позволяющим выпускать сейсмоприемник серийно с минимальным использованием импортных компонентов. Исполнение сейсмоприемника обеспечивает возможность работы с ним в широком диапазоне климатических условий, высокую надёжность и удобство эксплуатации, в том числе неподготовленным персоналом. Проведена работа по значительному снижению уровня собственных шумов сейсмоприёмника с целью расширения области применения СПВ-ЗК.

В сейсмометрии, в инженерно-геологических исследованиях промплощадок, при техническом контроле уровня колебаний сложных объектов, зданий и сооружений в области частот 0.5...60 Гц имеется спрос на современные надёжные малогабаритные велосиметры. До последнего времени при высокоточных полевых наблюдениях отечественными приборами на практике применялись электродинамические сейсмоприемники СМ-З, а в строительстве С-5-С и ВЭГИК. К основным недостаткам при использовании этих сейсмометров в инженерных и полевых приложениях следует отнести большой вес и габариты (для СМ-З: 6 кг, 230x170x145 мм на каждую компоненту), а так же необходимость при установке производить ручную регулировку положения подвижной части сейсмометра для сохранения его в рабочем состоянии. Новый велосиметр СПВ-ЗК [1], рассчитан на замену указанных приборов в ряде областей применения. Он лишен многих недостатков сейсмометров предыдущих поколений. При меньшей массе и габаритах (см. рис.1 и технические характеристики ниже) СПВ-ЗК содержит в одном корпусе три измерительных компоненты (вертикальная и две горизонтальных). Кроме того, прибор устанавливается в



▲ Рис. 1. Внешний вид сейсмоприёмника СПВ-ЗК.

точке наблюдения без необходимости настройки и готов к измерениям в течение минуты после включения питания, что повышает его эксплуатационные характеристики.

Малые габариты первичных однокомпонентных датчиков СПВ-Зк позволяют разработать малогабаритный скважинный велосиметр, работа над которым в настоящее время ведется в ООО «Логические системы».

В последнее время появился интерес к разведке и детальному районированию, в том числе в целях разведки и контроля разработки нефтяных месторождений,

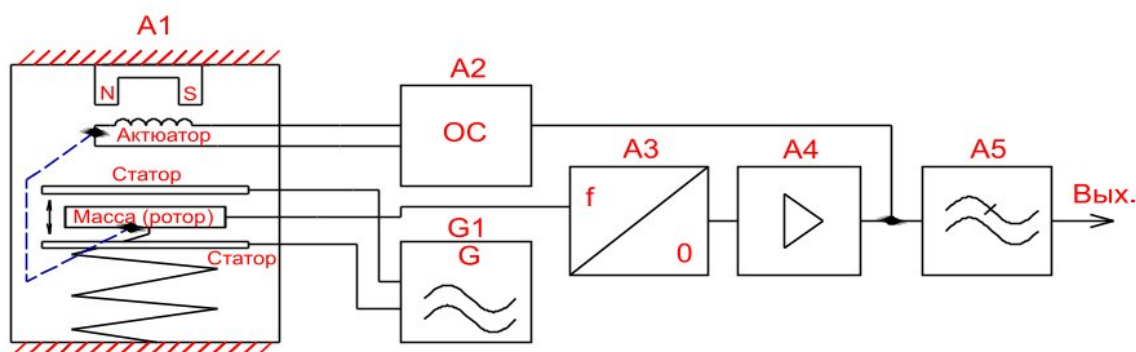
пассивными методами, например, ReMi (refraction microtremor). При этом анализируются записи не отклика среды на мощные искусственно сгенерированные сигналы, а микросейсмического фона, записанного несколькими датчиками в течение достаточно продолжительного времени. Регистрирующая аппаратура при этом должна обладать низким уровнем шума (до 6 нм/с на частоте 8 Гц) и высокой степенью идентичности характеристик. Рядом геоизыскательских организаций успешно применяется малозумящий малогабаритный электродинамический велосиметр LE-3D lite немецкой фирмы LENNARTZ. Однако в связи с развитием экономической ситуации в России и введением санкций со стороны ряда стран на повестку дня встала задача импортозамещения. Для её решения производителем в короткие сроки была решена задача модернизации велосиметра СПВ-3к с целью уменьшения собственных шумов сейсмоприёмника и увеличения динамического диапазона регистрации. При этом рабочая полоса частот СПВ-3к соответствует велосиметру LE-3D lite, а в низкочастотной области превосходит в два раза (0,5...65 Гц – СПВ-3к, 1...80 Гц – LE-3D lite). Если учесть, что стоимость немецкого велосиметра примерно в 2 раза выше, на сегодняшний день велосиметр СПВ-3к

становится весьма привлекательным на нашем рынке по соотношению цена/качество.

В ООО «Логические системы» решена задача создания сейсмометра, все элементы которого производятся по разработанной фирмой оригинальной конструкторской документации. Импортные позиции соответствуют лишь электронным компонентам прибора, причём используется современная элементная база. Вся механическая часть, включая пружины, магнитоэлектрический преобразователь с магнитом, корпус сейсмометра, изготавливается в РФ. ООО «Логические системы» производит велосиметр СПВ-3к малыми сериями.

Основным элементом сейсмоприёмника СПВ-3к (в дальнейшем СП) является датчик А1, который представляет собой ёмкостный дифференциальный преобразователь перемещения со средней подвижной обкладкой – ротором и двумя неподвижными обкладками – статорами. Ротор датчика жестко связан с инерционным элементом – массой, которая, в свою очередь установлена в корпусе посредством фасонных пружин. На статорные обкладки подаётся опорное напряжение высокостабильного генератора G1. При этом колебания ротора вызывает амплитудную модуляцию, которая выделяется с помощью

▼ Рис. 2. Структурная схема сейсмоприёмника СПВ-3к.



амплитудного детектора А3. Сигнал, пропорциональный величине смещения ротора от положения баланса напряжений преобразователя, усиливается малошумящим усилителем А4 и после ФНЧ А5 сигнал подаётся на выход. Для обеспечения требуемой амплитудной и фазовой частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) СП, а так же формирования на выходе сигнала, пропорционального скорости, действующей вдоль измерительной оси СП, используется электромеханическая отрицательная обратная связь (ОС), сигнал для которой формируется в пропорционально-интегрально-дифференциальном (в дальнейшем PID) регуляторе А2. Для коррекции сигнала ёмкостного преобразователя сигнал ОС подаётся на катушку электромагнитного преобразователя, жестко связанного с массой датчика (А1). Таким образом, осуществляется непрерывная коррекция АЧХ СП. Большим преимуществом СП, построенного по схеме параметрического преобразователя с ОС, является отсутствие постоянной составляющей в выходном сигнале СП. Таким образом, допускаются небольшие отклонения СП от вертикального положения оси без перегрузки выходного сигнала, связанного со смещением нуля, т.к. постоянное смещение будет оставаться в пределах нескольких милливольт при амплитуде сигнала ± 3.5 В. При возникновении сильных внешних воздействий, выводящих сигнал в зону ограничения, СП восстанавливает свою работоспособность в течение нескольких секунд, что позволяет, например, переносить датчик на новое место наблюдений без выключения питания.

Шумы сейсмоприемника можно разделить на 2-е группы: механические

шумы и электрические. К механическим шумам относятся шумы подвеса маятника датчика, вызванные влиянием температурного дрейфа и атмосферного давления, шумы, вызванные резонансными явлениями конструкции, температурные шумы магнитной системы. Для уменьшения влияния механических шумов в конструкции СП применены технологии изготовления прецизионных высокочастотных пружин, оптимизация геометрии взаимного расположения и крепления элементов датчика, использование высококачественных магнитов с малой температурной зависимостью а также магнитного экрана. Дальнейшее уменьшение механических шумов может быть достигнуто лишь термостатированием и вакуумированием конструкции, однако это приведет к неоправданному повышению габаритов, потребления энергии и стоимости датчика.

Электрические шумы СП вызваны, во-первых, нестабильностью частоты и амплитуды опорного генератора G1, связанных с влиянием шумов источника питания и температурного дрейфа, во-вторых, тепловым шумом измерительного моста, температурным дрейфом амплитудного детектора А3, дрейфом усилителя А4 и усилителя ОС А2, в-третьих, собственным шумом активных элементов (особенно усилителя А4 и интегратора PID-регулятора). Кроме этого, на общий уровень шума оказывают влияние внешние эфирные помехи. Разработчиками применен ряд схемотехнических решений, позволивших существенно минимизировать общий уровень собственных шумов СП.

В предыдущей версии СПВ-3к динамический диапазон датчика составлял 100 дБ. Улучшенная версия обладает пони-

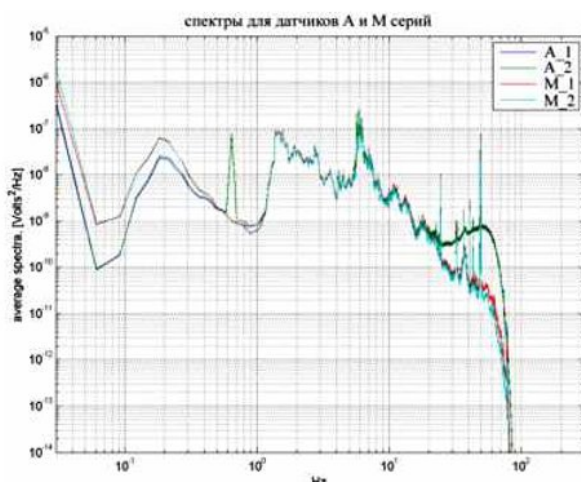
женными шумами, выходящими на уровень 6 нм/с. Схемотехника СП претерпела ряд изменений, что позволило увеличить динамический диапазон измерения скорости до 120 дБ. Кроме уменьшения общего уровня шума, особенно в диапазоне от 12...65 Гц, удалось улучшить чувствительность в диапазоне 1...12 Гц. Общая линейаризация тракта СП позволила значительно уменьшить интермодуляционные искажения. Таким образом, удалось избавиться от собственных помех в области частот от 0,1 ...1 Гц, в прошлой версии вызываемых нелинейным наложением шума из области частот выше 15 Гц. Улучшение собственной линейности тракта позволило уменьшить глубину корректирующей обратной связи интегрирующей цепи датчика. При этом уменьшился завал АЧХ в низкочастотной области спектра. И хотя нижняя частота среза СП составляет 0,5 Гц, у пользователя появилась возможность работать на спаде АЧХ в области частот от 0,1...1 Гц, что позволяет расширить диапазон применения сейсмоприёмника при низкочастотных измерениях. Однако вне рабочего диапазона может потребоваться восстановление сигнала с

использованием параметров передаточной функции (деконволюция сигнала).

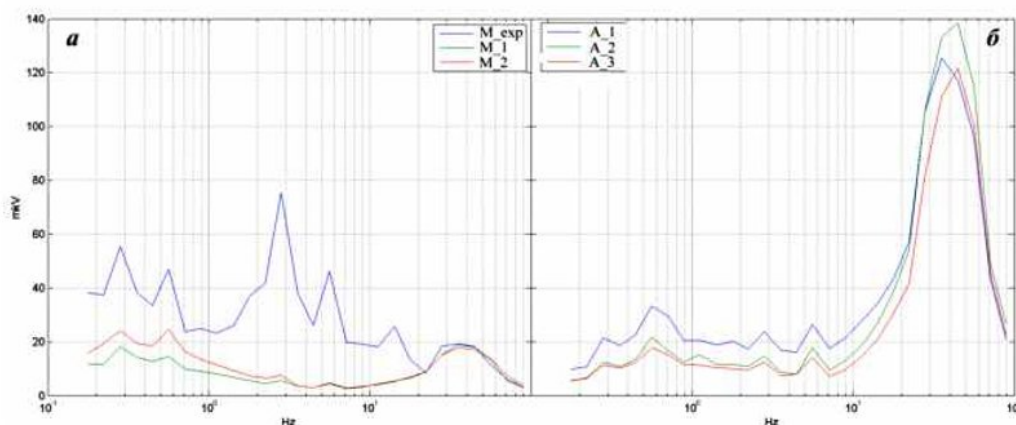
Расчёт шума сейсмоприемника с активной обратной связью является трудоёмкой задачей. Детально с расчётом шума можно познакомиться в работе [2]. Исключая сложные расчёты и оценки, можно произвести синтез отдельных частей схемотехники СП с целью минимизации собственных шумов. Тем не менее, инженерные расчёты не заменяют метрологию и для экспериментального определения шума сейсмоприёмника был применён метод, включающий в себя параллельную регистрацию сигнала двумя датчиками и вычисление величины разностного сигнала. Эта величина, в сущности, является верхней оценкой уровня собственных шумов. На первом этапе были вычислены спектры параллельных записей для СПВ-3К предыдущей серии (А) и модифицированного (М). На рис.3 приведены спектры для пар датчиков этих серий.

По спектрам можно качественно оценить идентичность приборов разных серий и отличия, указанные выше, то есть повышение уровня сигнала для частот выше 12 Гц и в диапазоне 0,6-1 Гц для серии А относительно серии М и повышение уровня сигнала для частот ниже 0,5 Гц в серии М относительно А. Первая особенность трактуется нами как проявление собственных шумов датчиков серии А, вторая – как уменьшение степени подавления низкочастотных сигналов для серии М. В диапазоне частот 1-12 Гц приборы обеих серий практически идентичны по характеристикам как шумовым, так и по передаточной функции. Заметим здесь, что измерения проводились в условиях минимального входного сигнала, что позволяет уверен-

▼ Рис. 3. Спектры параллельных записей датчиков серий А и М.



► Рис. 4.
Вычисленные
по экспери-
ментальным
данным
значения
шумов
датчиков
разных
серий.



но интерпретировать особенности представленных спектров. Например, повышение мощности сигнала в полосе 0.1-0.9 Гц указывает на регистрацию т.н. штормовых микросейсм, хорошо известных сейсмологам.

Для расчёта разностного сигнала использовались не спектры записей, а сами записи колебаний. При обработке сигналы фильтровались набором полоспропускающих третьоктавных фильтров, фильтрованные сигналы выравнивались по максимальной амплитуде сигнала во временном окне для компенсации различия коэффициента преобразования, а также выравнивались по времени для компенсации различия ФЧХ. Рис.4 наглядно иллюстрирует полученные результаты в амплитудных (не среднеквадратичных) значениях. Измерения и расчёты проводились для представления выходного сигнала датчиков в микровольтах, с целью предоставить возможность оценки уровней сигнала (шумов) различным специалистам. Для перевода величин в скорость колебаний грунта с размерностью [м/сек] достаточно разделить значения ординаты точки графика на коэффициент преобразования (см. ниже технические характеристики).

M_{exp} – кривая для случая, когда один из датчиков пары специально для про-

верки работоспособности метода был зашумлён в механической части (см. выше). На рис. 4б представлены результаты для трёх пар датчиков предыдущей серии.

Распределение шумов по сериям и компонентам подтверждает вышеизложенные замечания, относящиеся к редукции шумов. В новой серии (М) достигнуто более чем двукратное понижение уровня шума по сравнению со старой в рабочей полосе частот, точнее в полосе 1-12 Гц — полосе минимального шума для старой (А) серии. Снижение шума на частотах выше 12 Гц за счет модернизации преобразователя достигает, практически, целого порядка по амплитуде. Следует отметить снижение уровня шума и на низкочастотном срезе частотной характеристики. С учётом подъёма чувствительности на частотах ниже 0.5 Гц для новой серии (рис.4а) шумовая картина лучше соответствует математической (расчётной) модели шумов датчика, которая указывает на повышение уровня собственных шумов при удалении от рабочего диапазона частот в обе стороны. Видимое снижение уровня шумов для старой серии в этом диапазоне (рис.4б) связано с более активным подавлением низкочастотного сигнала цепью интегратора ОС датчика.

Таким образом, задача снижения

▼ Табл. 1. Технические характеристики модернизированной серии СПВ-ЗК.

1. Тип преобразователя	ёмкостной;
2. Число компонент	3 (одна вертикальная, две горизонтальных);
3. Диапазон частот по уровню –ЗдБ, Гц	0.5...65;
4. Неравномерность АЧХ не более 1 дБ в диапазоне частот, Гц	0.6...45;
5. Динамический диапазон, не менее, дБ	120;
6. Коэффициент преобразования В*с/м,	400;
7. Максимальная амплитуда сигнала на симметричных выходах, В	±3,5;
8. Постоянная составляющая на выходе, не более, мВ	±10;
9. Допустимое отклонение СПВ-Зк от вертикали, градусов	±15;
10. Напряжение питания однополярное нестабилизированное, В	6...25;
11. Потребляемая мощность сейсμοприемника, Вт	0,5;
12. Диаметр, мм	160;
13. Высота (с ручкой), мм	135;
14. Масса (без кабеля), кг	2,9;
15. Диапазон рабочих температур, градусов С°	-30...+55;
16. Пылевлагозащищённость	IP67 (герметично);

шумов сейсμοприёмника СПВ-Зк на текущем этапе решена путём модернизации цепей первичного преобразователя датчиков. Это расширило возможности применения сейсμοприёмника при решении различных задач геофизики.

Для обеспечения оперативной поверки сейсμοприемника в полевых и стационарных условиях в состав СПВ-ЗК входит генератор калибровочных импульсов. Управление генератором осуществляется с помощью внешнего сигнала, который вырабатывает регистратор сейсмических сигналов, осуществляющий запись сигналов СП.

СПВ ЗК имеет свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.28.001.A № 49110 и производится на производстве сертифицированного по ISO9001.

Литература

1. Мишин А.В. и др., Малогабаритный сейсμοприемник СПВ-ЗК, // Приборы и системы разведочной геофизики, №1, 2013, с.35-38

2. Левинзон Ф.А., Зюзин В.Н. Ёмкостный датчик смещения как чувствительный преобразователь низкочастотных механических колебаний в электрические сигналы // Регистрация и обработка сигналов в сейсмометрии, Сейсмические приборы; Вып. 15, М.: Наука, 1982, стр.88-91