

## Методы виброзащиты векторных приемников

В. И. Коренбаум\*

*Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичева ДВО РАН*

*Россия, 690041 Владивосток, ул. Балтийская, д. 43*

(Статья поступила 16.07.2017; Подписана в печать 18.09.2017)

Проблема виброзащиты векторных приемников вытекает из повышенной вибрационной чувствительности этого класса гидроакустических датчиков. Для виброзащиты векторных приемников потенциально пригодны: виброизоляция, виброкомпенсация, интенсивметрическое виброподавление. В зависимости от значений собственной частоты подвеса, конструктивных особенностей векторных приемников инерционного и силового типов рассмотрены возможности и ограничения этих методов. Разработаны оригинальные технические решения.

PACS: 43.38.+n, 43.40.+s.

УДК: 53.091, 534-14.

Ключевые слова: векторные приемники, виброзащита, виброизоляция, виброкомпенсация, интенсивметрия, виброподавление.

### ВВЕДЕНИЕ

Векторные приемники (ВП) при использовании в точечных и линейных антенных системах перспективны для обеспечения пространственной избирательности, пеленгования и определения местоположения источников низкочастотных подводных шумов, и потому внимание к их разработке и методам применения с середины первого десятилетия XXI века вновь усилилось (например, [1]). Известны четыре схемы построения ВП: 2-х точечные, разностные, силовые и инерционные [2]. При этом качественные дипольные характеристики направленности (с глубокими поперечными провалами) при размерах, много меньших длины волны, реализуются только двумя последними. Однако в области низких частот (примерно ниже 100 Гц) становятся существенными помехи, связанные с вибрационными воздействиями. Проблема виброзащиты ВП силовой и инерционной схем вытекает из повышенной вибрационной чувствительности этого класса гидроакустических датчиков, являющейся следствием принципов их функционирования (приемники первого порядка [3]).

Данная проблема еще более обостряется в связи с расширением сфер применения ВП силового и инерционного типов в низкочастотном диапазоне на мобильных носителях [1]. Существует ряд методов, потенциально пригодных для виброзащиты ВП — виброизоляция, виброкомпенсация, мультипликативное виброподавление при интенсивметрической обработке. Целью работы является исследование возможностей и ограничений применения указанных методов виброзащиты для ВП инерционного и силового типов в зависимости от рабочего диапазона частот и конструктивных особенностей датчиков.

### 1. ВИБРОИЗОЛЯЦИЯ

Первым фактором, требующим рассмотрения, является собственная частота подвеса ВП  $f_0$ . Гибкая система подвеса является необходимым элементом ВП инерционного типа. Для свободного перемещения под действием звуковой волны в среде ВП инерционного типа он должен быть колебательно развязан, и, следовательно, его рабочий диапазон частот должен лежать существенно выше собственной частоты подвеса. Поскольку ВП инерционного типа выполняются с нейтральной плавучестью, и их инерционная масса невелика, низкое значение собственной частоты подвеса может определяться только его гибкостью. В то же время гибкость подвеса ограничивается требованиями конструктивной прочности, наиболее критичными для мобильных носителей. В результате, собственная частота подвеса обычно не может быть выполнена существенно ниже 0.5–1 Гц. Следовательно, рабочий диапазон таких ВП не может быть ниже 5–10 Гц. Заметим, что при работе в диапазоне частот от 5–10 до 100 Гц ВП инерционного типа оказывается защищенным от вибраций корпуса носителя с помощью виброизоляции, вносимой системой подвеса, на величину 20–40 дБ, определяемую известным законом виброизоляции  $20 \lg(f/f_0)$ , где  $f$  — текущее значение частоты.

Может показаться, что для ВП силового типа возможно жесткое закрепление, поскольку принцип работы ВП этого типа предполагает неподвижность корпуса, относительно которого под действием градиента давления деформируются пьезопреобразователи (чаще всего пластинчатые [3]). Однако виброизоляция ВП и здесь необходима для защиты от вибрационных помех. Для этого, так же как в предыдущем случае, необходимо работать существенно выше резонанса подвеса. В то же время «большая масса корпуса ВП силового типа, чем инерционного (ограниченного средней плотностью среды), может позволить снизить собственную частоту подвеса и тем самым несколько расширить рабочий диапазон этих ВП в низкочастотную область.

\*E-mail: [v-kor@poi.dvo.ru](mailto:v-kor@poi.dvo.ru)

## 2. ВИБРОКОМПЕНСАЦИЯ

Дополнительную возможность защиты ВП силового типа от вибраций предоставляет виброкомпенсация. Ранее был предложен принцип компенсационной виброзащиты, который предполагал соосное размещение внутри корпуса ВП в воздушном зазоре пьезопреобразователей, аналогичных внешним датчикам градиента давления, и выполняющих роль акселерометров. Однако, даже будучи идеально идентичными, внешний и внутренний пьезопреобразователи функционируют в разных условиях из-за влияния на внешний из них окружающей водной среды. Это воздействие на частотах, когда преобразователь много меньше длины волны, может быть представлено присоединенной (соколеблющейся) массой среды. В случае двусторонне нагруженного круглого изгибающего пьезопреобразователя присоединенная масса приближенно может быть выражена как  $8\rho\frac{R^3}{3}$ , где  $\rho$  — плотность среды,  $R$  — радиус круглого пьезопреобразователя. Основная идея компенсационной виброзащиты [4] заключалась в механическом моделировании этой присоединенной массы на внутреннем пьезопреобразователе за счет нагрузки водным слоем, заливочным компаундом и даже металлическими пластинками. Описанный подход реализован на трех разновидностях ВП силового и разностного типов с достижением подавления вибраций в осевом направлении 15–25 дБ, на частотах ниже собственного изгибающего резонанса пластинчатых пьезопреобразователей.

Прогресс цифровой электроники открывает возможность отказаться от механического моделирования присоединенной массы в пользу электрического, и даже программного, а это позволяет заменить внутренние пьезопреобразователи малогабаритными акселерометрами. Предложена конструкция ВП силового типа с компенсационной виброзащитой (рис. 1, рис. 2). ВП (рис. 1) состоит из двух ортогонально установленных друг за другом на оси цилиндрического корпуса из звукоотражающего материала 1 круглых изгибающих пьезопреобразователей 2, 3. Пьезопреобразователи снабжены патрубками, выполненными в корпусе в виде полых каналов 6, 7, сечение которых плавно меняется от круглого у пьезопреобразователя к прямоугольному на поверхности корпуса без уменьшения площади сечения. Оси каналов направлены навстречу друг другу так, что их выходы на поверхность корпуса лежат в ортогональных плоскостях и обеспечивают единый фазовый центр обоим ортогональным компонентам ВП [5].

Полезный сигнал, воспринимаемый ВП (рис. 1), представляет собой градиент давления, действующий на оппозитные стороны изгибающих пьезопреобразователей.

В отношении вибрационной помехи изгибные пьезопреобразователи функционируют как акселерометры, имеющие максимум чувствительности вдоль своей оси. Для компенсационной виброзащиты ВП дополнительно снабжен двумя акселерометрами 4, 5, ори-

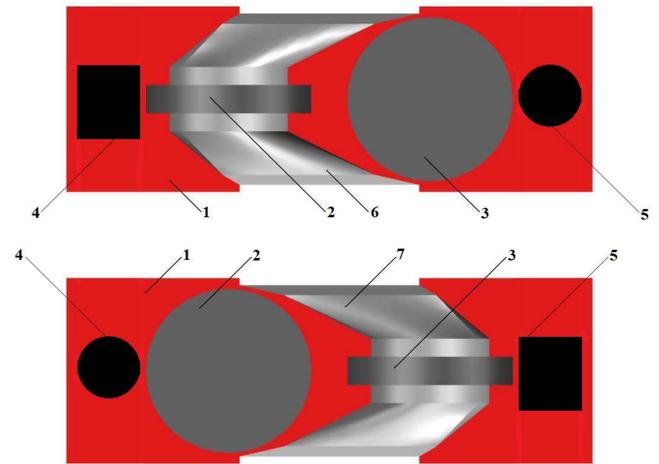


Рис. 1: Фронтальный разрез ВП силового типа с виброкомпенсационной защитой и вид сверху (обозначения в тексте)

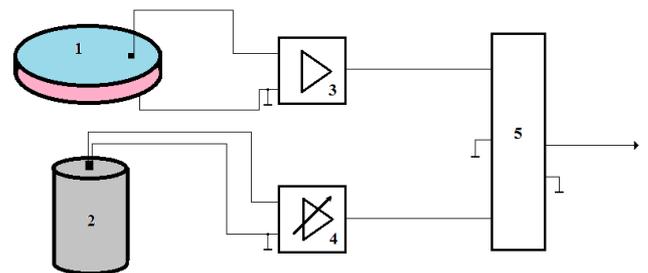


Рис. 2: Схема виброкомпенсационного подключения по одной компоненте ВП (обозначения в тексте)

ентированными соосно с соответствующими пьезопреобразователями 2, 3. По каждой из двух компонент ВП (рис. 2) выход акселерометра 2 подключен через усилитель с регулируемым коэффициентом усиления 4 к входу вычитающего устройства 5, к второму входу которого подключен через усилитель с постоянным коэффициентом усиления 3 выход изгибающего пьезопреобразователя 1.

Для точной настройки ВП помещают под поверхность воды бассейна, крепят на виброболт перевернутого над поверхностью воды вибростола за торцы с обеспечением заполнения водой внутренних каналов корпуса и возбуждают продольные колебания корпуса ВП последовательно в направлениях максимумов чувствительности каждой из компонент. Изгибный пьезопреобразователь 1 (рис. 2) в воде оказывается естественно нагруженным присоединенной массой при колебаниях корпуса ВП, аналогично условиям реальной эксплуатации. При этом коэффициенты усиления усилителей 4, подключенных к акселерометрам 2 устанавливают так, чтобы обеспечить минимальный уровень отклика на вибрационную помеху с выхода вычитаю-

щего устройства 5, соответствующей компоненты ВП, т.е. максимум подавления вибрационной помехи. Заметим, что влияние переотражений звуковой волны от дна бассейна достаточно мало и может быть еще более снижено при наклонном подвесе вибростола. В результате, можно ожидать компенсационного подавления вибрационной помехи в полосе частот на 30–40 дБ. Такой же глубиной ослабления 30–40 дБ характеризуется поперечная вибрационная чувствительность внешнего изгибного пьезопреобразователя и внутреннего акселерометра ВП. Таким образом, при достаточно точной установке этих преобразователей на оси жесткого корпуса (рис. 1) вибрационная чувствительность ВП не будет иметь существенной угловой направленности и окажется равномерно сниженной на 30–40 дБ. Любопытно, что компенсационная виброзащита также нивелирует эффект паразитного ослабления полезного сигнала при частичной подвижности корпуса ВП в плоской звуковой волне, что позволяет уменьшить массу корпуса или сдвинуть рабочий диапазон частот ближе к собственной частоте подвеса.

### 3. ИНТЕНСИМЕТРИЧЕСКОЕ ВИБРОПОДАВЛЕНИЕ

Для ВП инерционного типа компенсационная виброзащита неосуществима принципиально. Однако, здесь применимо интенсивметрическое виброподавление, основанное на мультипликативной обработке откликов ВП и датчика звукового давления, известное в подводной акустике как определение потока мощности. Данное решение пригодно и в случае доминирования помех обтекания. Так в работе [6] показана возможность подавления помех обтекания и вызванных ими вибраций при продольном обтекании фрагмента гибкой антенны на 12–25 дБ относительно квадратичного тракта ВП. Ограничение величины подавления помех связано с асимметрией опозитных изгибных пьезопреобразователей использовавшегося датчика звукового

давления (технологической разброс чувствительности к давлению не менее 10%), следствием чего является паразитная чувствительность к осциллирующей компоненте помех обтекания и вибрациям тела антенны в направлении перпендикулярном ее оси. В результате, имеется остаточная корреляция откликов ВП и датчика звукового давления, которая и снижает потенциально достижимое подавление помех при интенсивметрической обработке. Для устранения этого эффекта предложена оптимизированная по сравнению с [6] схема комбинированного приемника [7] с ВП инерционного типа, датчик звукового давления в которой выполнен на цилиндрическом пьезопреобразователе, характеризуемом повышенной симметричностью параметров в направлениях перпендикулярных потоку.

Необходимо отметить, что, в отличие от виброизоляции и виброкомпенсации, не препятствующих осуществлению аддитивных методов обработки, интенсивметрическое виброподавление, будучи мультипликативным вариантом обработки, считается не оптимальным при обнаружении слабых полезных сигналов в удаленных шумах моря.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зависимости от собственной частоты подвеса векторных приемников и их конструктивных схем рассмотрены возможности и ограничения виброизоляции, виброкомпенсации и интенсивметрии в снижении воздействия низкочастотных вибрационных помех. Разработаны технические решения по снижению уровня вибрационных помех приемников силового и инерционного типов на 20–40 дБ.

Исследование частично поддержано Программой фундаментальных исследований Дальневосточного отделения РАН, грант 15-IV-1-001 (НИР № 11511170008).

- [1] Thode A., Kim K., Norman R., Blackwell S., Greene C. J. *Acoust. Soc. Am.* 2016. **139**, N 4. Part 1. EL105.  
[2] Гордиенко В. А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.  
[3] Скребнев Г. К. Комбинированные гидроакустические приемники. СПб.: Элмор, 1997.  
[4] Коренбаум В. И., Тагильцев А. А. А.с. N 1521244 СССР. Бюллетень «Открытия Изобретения». 1989. N 41, С. 272.

- [5] Коренбаум В. И., Тагильцев А. А., Горовой С. В., Фершалов Ю. Я. Патент N 2568411 РФ. Оpubл.: 16.10.2015. Бюл. 32.  
[6] Korenbaum V. I., Tagiltsev A. A. *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. **131**, N 5. P. 3755.  
[7] Коренбаум В. И., Тагильцев А. А. Патент N 2501043 РФ. Оpubл.: 10.12.2013. Бюл. 34.

## Methods of vibration protection of vector sensors

V. I. Korenbaum

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of FEB RAS. Vladivostok, 690041, Russia  
E-mail: v-kor@poi.dvo.ru

The problem of vibration protection of vector sensors results from the increased vibration sensitivity of this class of hydroacoustic sensors. Vibration isolation, vibration compensation, and intensimetry vibration suppression are potentially suitable for vibration protection of vector sensors. The possibilities and limitations of these methods are considered depending on a value of the natural frequency of suspension, construction features of vector sensors of inertial and force types. Original technical solutions are developed.

PACS: 43.38.+n, 43.40.+s

*Keywords:* vector sensors, vibration protection, vibration isolation, vibration compensation, intensimetry, vibration suppression.

*Received 16 July 2017.*

#### **Сведения об авторе**

Коренбаум Владимир Ильич — доктор техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (423) 237-56-98,  
e-mail: v-kor@poi.dvo.ru.

---