

УДК 621.47

DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55481

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНОГО РЕЗОНАТОРА СВЧ

© 2014 Е.Н. Козырев, д.т.н., проф., А.Г. Симакин, к.т.н.

Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и РСО-А, Россия, 362002,  
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, E mail: vzaal@mail.ru

В статье рассмотрены результаты исследования генераторов сверхвысоких частот на волнах типа  $H_{01}$  и ТЕМ (поперечная электромагнитная волна), используемых в качестве датчиков для регистрации и измерения слабых сейсмических колебаний.

Приведены зависимости отдельных характеристик сейсмоприемников на основе объемных резонаторов на волнах типов  $H_{01}$  и ТЕМ.

**Ключевые слова:** объемный резонатор СВЧ, датчик малый перемещений, сейсмический преобразователь.

При рассмотрении требований, предъявляемых к сейсмическим преобразователям (СП), а также при использовании в сейсмологии идеологических и технических решений, проведенными исследованиями было показано, что создание высоконадежного широкополосного и простого СП возможно на основе высокодобротного генератора сверхвысоких частот на базе объемного резонатора с волной типа  $H_{01}$ , важным параметром которого является стабильность частоты генерируемых колебаний.

Использование волны типа  $H_{01}$  в объемном резонаторе на основе круглого волновода обеспечивает высокую добротность резонатора. Волна типа  $H_{01}$  обладает аномальными свойствами. Затухание этой волны по мере удаления от критической частоты асимптотически стремится к нулю при неограниченном росте частоты за счет наличия поперечных (кольцевых) токов. Конструктивные особенности резонаторов при кольцевых токах волны  $H_{01}$  приводят к работе на «чистой» волне типа  $H_{01}$ .

Колебательная система генератора включает высокодобротный цилиндрический резонатор, возбуждаемый на виде колебаний типа  $H_{011}$ , и связанный с резонатором отрезок коаксиальной линии. Активный элемент (лавинно-пролетный диод типа ЗА707Б) установлен на конце коаксиального отрезка и на другом конце установлена согласованная нагрузка.

Рассматриваемый генератор имеет фиксированную настройку. Резонансная частота колебательной системы определяется неизменным расстоянием между торцевыми стенками цилиндрического резонатора. Все элементы конструкции резонатора выполнены из инвара – материала с низким коэффициентом температурного расширения.

Оценка долговременной стабильности частоты проводилась путем многократных и длительных измерений значения разности частот двух идентичных генераторов. Генераторы подключались к развязанным плечам трехдецибелльного волноводно-щелевого моста. К двум другим плечам подключались согласованная нагрузка

и смеситель. Разностная частота измерялась цифровым частотомером. Электрическое питание обоих диодов осуществлялось от одного стабилизированного источника напряжения.

Было установлено, что после соответствующего прогрева, обеспечивающего установление состояния термодинамического равновесия, изменение разностной частоты системы в течение длительного времени (длительность процесса измерения составляла не менее 24 часов) не превышает  $\pm 1,5$  кГц.

Столь высокая стабильность частоты позволяет использовать рассматриваемый генератор в качестве весьма чувствительного датчика в самых разнообразных измерительных системах. Любое внешнее воздействие, способное изменить резонансную частоту колебательной системы, может быть зарегистрировано и измерено. Используемая при оценке стабильности частоты используется схема включения двух генераторов, где один генератор является опорным, а другой выполняет функции датчика, может быть успешно применена при исследовании слабых сигналов природно-техногенной природы, например, сейсмической активности.

Торцевая стенка цилиндрического резонатора, работающего на виде колебаний  $H_{01}$ , не имеет контакта с цилиндрическим корпусом, что позволяет сравнительно просто обеспечить перемещение этой стенки относительно корпуса за счет внешних воздействий. Устройство подобного датчика малых перемещений схематически показано на рис. 1.

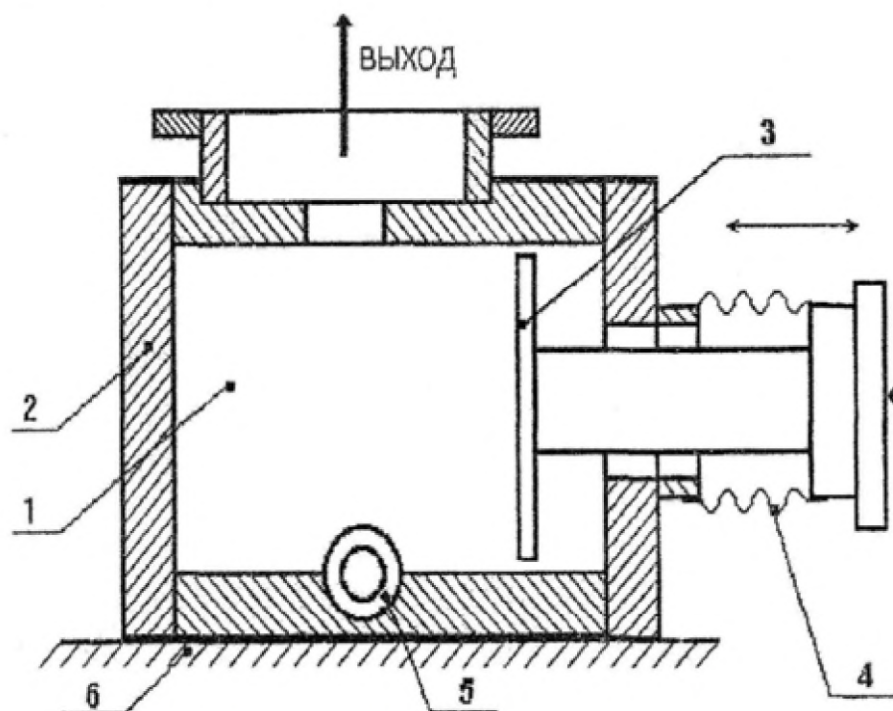


Рис. 1. Схема устройства датчика малых перемещений

1 – резонатор; 2 – неподвижная стенка; 3 – подвижная стенка; 4 – сильфон; 5 – коаксиальная линия; 6 – основание

Крутизна перестройки цилиндрического резонатора на виде колебаний  $H_{011}$  определяется соотношением:

$$\frac{df}{dl} = -0,82\alpha(4 + 2,69\alpha^2)^{-0,5} cl^{-2}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света,  $l$  – длина резонатора,  $\alpha$  – отношение радиуса резонатора к его длине.

Таким образом, с помощью рассматриваемого датчика можно уверенно регистрировать колебания торцевой стенки с амплитудой 0,1 мкм и менее.

Разработанный метод регистрации механических колебаний с малыми амплитудами может быть эффективно использован для решения разнообразных задач, например, при исследованиях сейсмической активности и оценке эффективности сейсмозащитных мер, при проведении сейсморазведки месторождений нефти и газа и т.п. Однако наиболее перспективно применение рассматриваемого датчика при создании региональных систем изучения сейсмической активности и прогнозирования землетрясений. Подобная система может содержать множество автономно работающих в различных точках региона датчиков, информация от которых будет поступать в единый обрабатывающий аналитический центр.

Основные трудности, возникающие при практическом использовании вида колебаний  $H_{011}$  в цилиндрическом резонаторе, связаны с подавлением других видов колебаний, которые могут возбудиться в цилиндрическом резонаторе, поэтому при выборе размеров полого резонатора (выборе отношения  $L/R$ ) основным критерием является максимальное разделение частот рабочего  $H_{011}$  и ближайших видов колебаний.

Основным достоинством рассматриваемого типа волны является очень высокая добротность резонатора  $Q_0$ , которая на практике может достигать до  $10^5$  для получения высокой стабильности частоты.

Перестройка разностной длины волны при волне  $H_{01}$  осуществляется при помощи передвижного поршня за счет изменения длины резонатора. При этом контакт поршня со стенками резонатора не играет никакой роли, так как токи в стенках резонатора направлены по окружности.

Для создания преобразователя для систем регистрации и измерения слабых (с субмикронными амплитудами) сейсмических колебаний был разработан и создан высокостабильный твердотельный генератор трехсантиметрового диапазона длин волн [Козырев, Симакин. 2007].

На рисунке 2 представлено схематичное изображение чертежа конструкции генератора. Генератор содержит цилиндрический объемный резонатор, возбуждаемый на виде колебаний  $H_{011}$ , и расположенную перпендикулярно оси резонатора диодную секцию, состоящую из отрезка коаксиальной линии, на одном конце которой включен ЛПД (лавинно пролетный диод), а на другом – стабилизирующая согласованная нагрузка. Использование бесконтактных короткозамыкающих поршней – передвижного настроечного и неподвижного термокомпенсатора – позволило обеспечить работу генератора на виде колебаний  $H_{011}$  и получить низкий уровень шумов и высокую стабильность частоты. Испытания этого генератора показали возможность получения уровня шумов и стабильности частоты, удовлетворяющих требованиям таких СВЧ устройств, как гетеродины систем связи, измерительные генераторы и т.д. [Богомолов, 1997].

Подключение генератора к внешней нагрузке осуществляется с помощью отрезка волноводной линии передачи 5 [Богомолов, 1997; А.с. № 862794 РФ. 1979].

Внешний вид серии разработанных генераторов, работающих на частотах  $f_{ген. ср} = 8,25, 10, 12, 4$  ГГц, показан на рисунке 3.

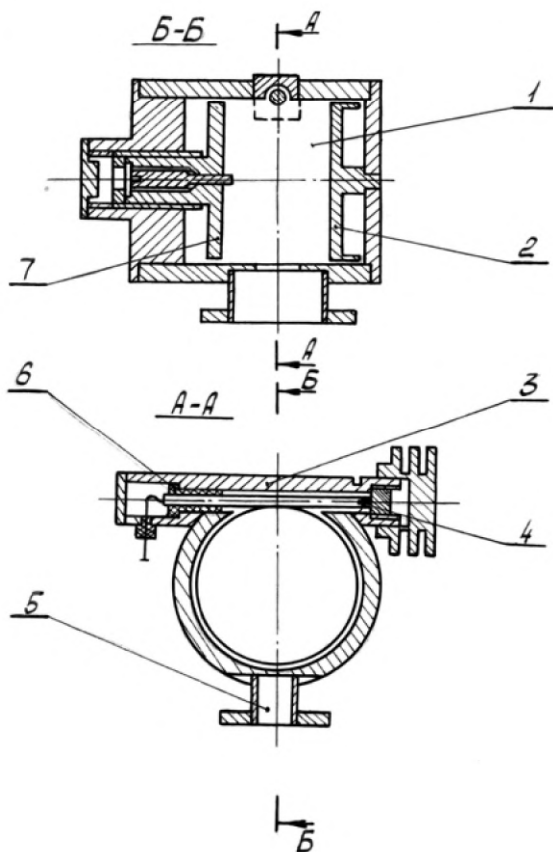


Рис. 2. ГЛПД (генератор на лавинно-пролетном диоде) с низким уровнем шума и высокой стабильностью частоты.  
 1 – цилиндрический резонатор, 2 – бесконтактный поршень, 3 – диодная секция, 4 – ЛПД, 5 – вывод энергии, 6 – стабилизирующая согласованная нагрузка, 7 – термокомпенсатор.

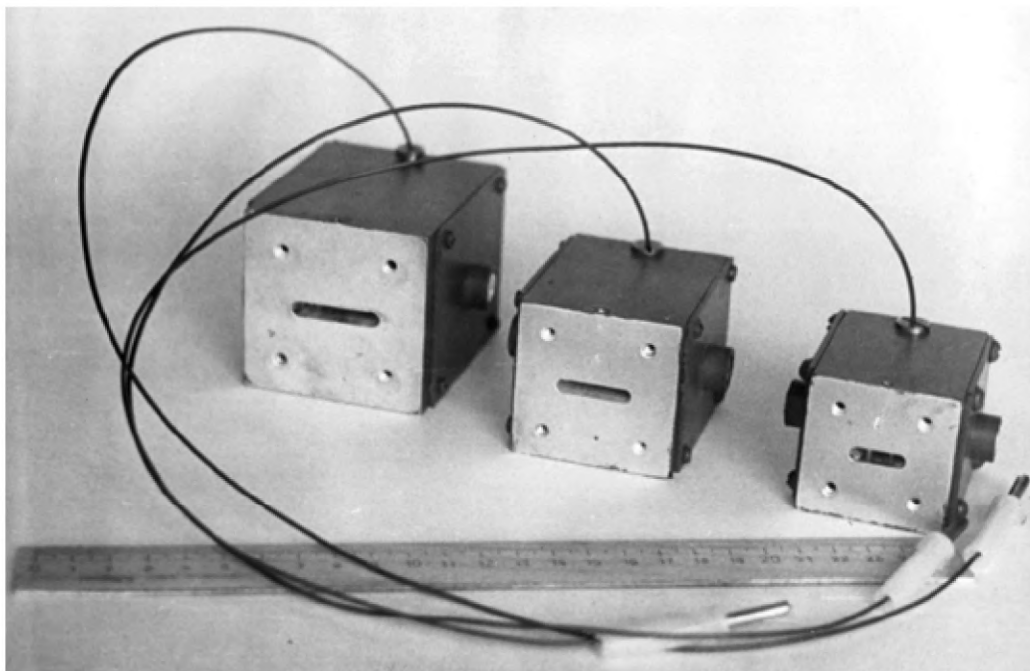


Рис. 3. Внешний вид конструкций однодиодных ГЛПД с цилиндрическими резонаторами на виде колебаний  $H_{011}$

Торцевая стенка цилиндрического резонатора не имеет контакта с цилиндрическим корпусом, что позволяет просто обеспечить перемещение этой стенки относительно корпуса за счет внешних воздействий.

Крутизна перестройки резонатора составляет примерно 100 кГц/мкм:

Следовательно, с помощью рассматриваемого преобразователя можно уверенно регистрировать колебания торцевой стенки с амплитудой 0,1 мкм и менее.

Проведенные эксперименты (рис. 4) подтвердили расчетные зависимости сейсмодатчика. В результате была разработана оптимизированная модель сейсмодатчика на основе объемного резонатора сверхвысоких частот с волной  $H_{01}$ . Схема конструкции представлена на рис. 5. Фотография представлена на рис. 6.

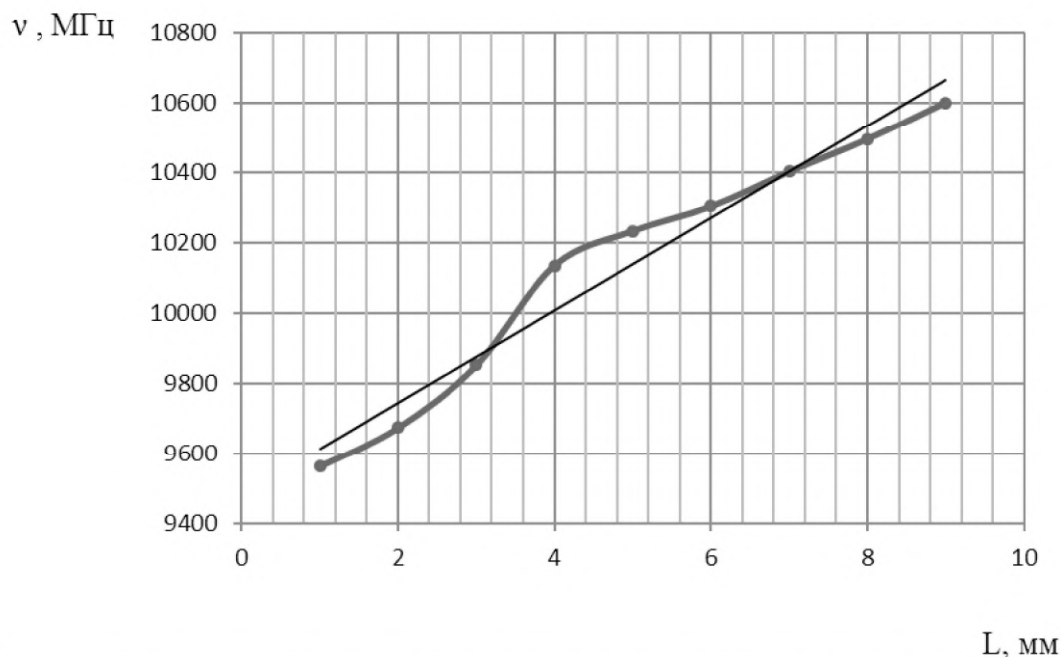


Рис. 4. Зависимость частоты генерации на ГЛПД от длины резонатора

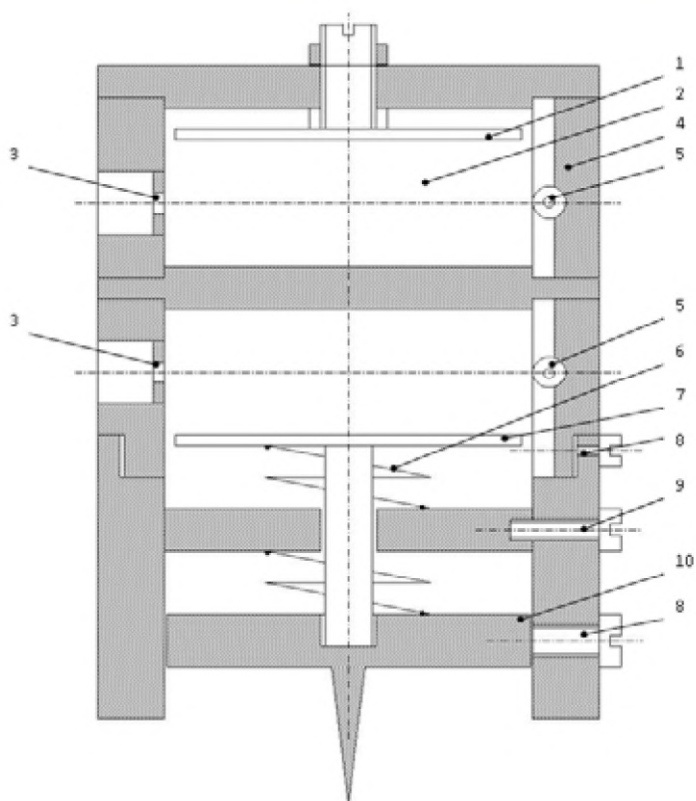


Рис. 5. Оптимизированный сейсмопреобразователь.  
1 – подстроечный поршень, 1 – объемный резонатор, 3 – отвод энергии, 4 – корпус, 5 – ГЛПД, 6 – пружина, 7 – поршень, 8 – стопорный винт, 9 – крепежный винт, 10 – установочный штырь



Рис. 6. Фотография сейсмопреобразователя

Исследования проводились на экспериментальной установке, блок-схема которой представлена на рис. 7.

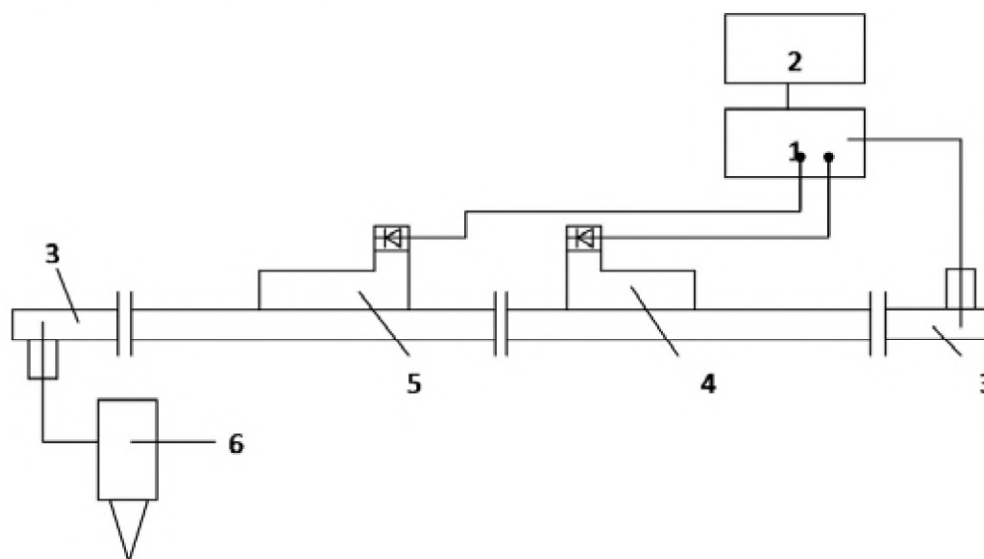


Рис. 7. Блок – схема экспериментальной установки.

1 – генераторный блок панорамной установки, 2 – индикаторный блок панорамной установки, 3 – коаксиально – волноводный переход, 4 – волноводный ответвитель падающей волны, 5 – волноводный ответвитель отраженной волны, 6 – испытуемый сейсмопреобразователь

Приведенная на рис. 7 установка имеет для испытаний широкий диапазон исследований от 8,10 до 12,0 ГГц и достаточно высокую чувствительность.

Также были предложены новые конструкции генераторов СВЧ трехсантиметрового диапазона. На основе коаксиального объемного резонатора СВЧ на волне  $TEM$  и на волне  $H_{01}$  с использованием транзистора типа КТ247А2, который устанавливается на конце коаксиального отрезка линии. Использование транзистора обеспечивает более стабильную работу генератора. Схемы предложенных конструкций и фото сейсмодатчиков приведены на рисунках 8-10.

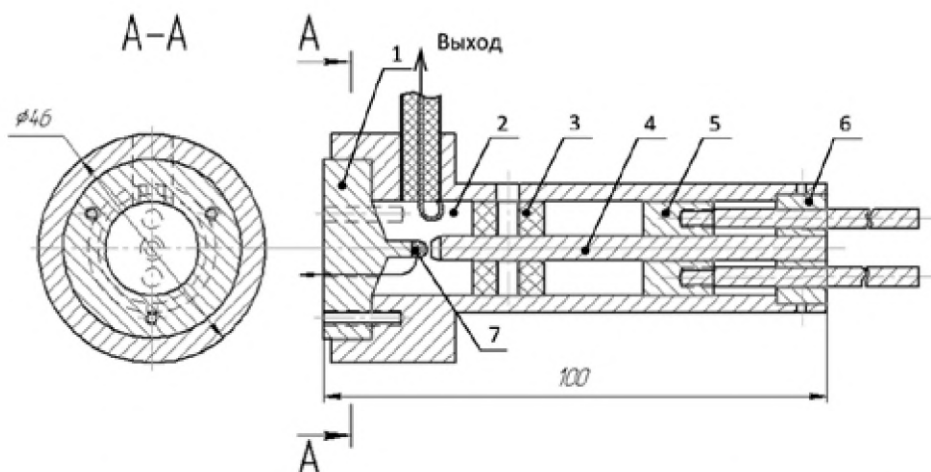


Рис. 8. Чертеж генератора СВЧ на основе коаксиального объемного резонатора СВЧ на волне ТЕМ. 1 – нижняя стенка, 2 – резонатор, 3 – диэлектрик, 4 – центральный стержень, 5 – подвижный стержень, 6 – верхняя стенка, 7 – транзистор

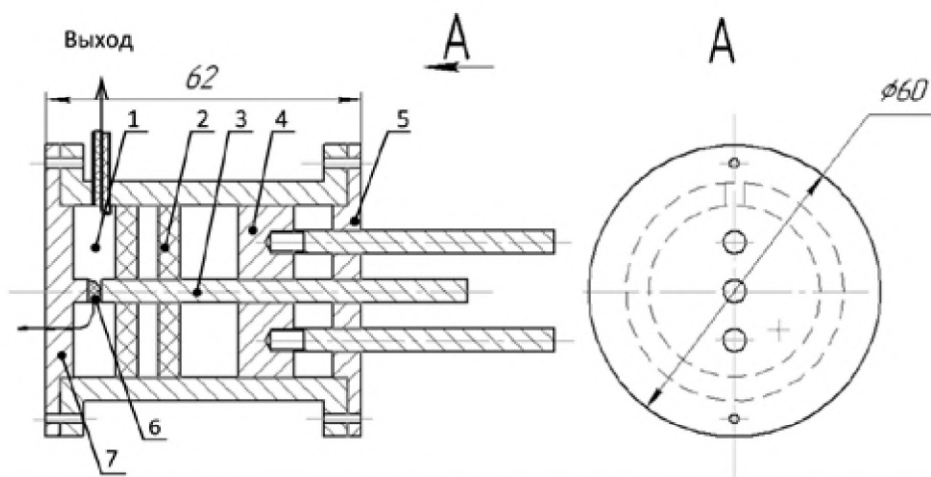


Рис. 9. Чертеж генератора СВЧ на основе коаксиального объемного резонатора СВЧ на волне  $H_{01}$ . 1 – резонатор, 2 – диэлектрик, 3 – центральный стержень, 4 – подвижный поршень, 5 – верхняя стенка, 6 – транзистор, 7 – нижняя стенка



Рис. 10. Фото сейсмопреобразователей на основе коаксиального объемного резонатора СВЧ на волне  $H_{01}$  и ТЕМ

Представленный на рис. 9 сейсмопреобразователь содержит коаксильный объемный резонатор на волне  $H_{011}$ . Для обеспечения устойчивой работы и предотвращения возникновения высших типов волн в конструкции предусмотрен бесконтактный поршень и во внешней трубе резонатора прорезаны специальные поперечные щели. Это позволит подавить все нежелательные типы волн, включая основную фундаментальную типа  $TEM$ .

Результаты исследования параметров этих сейсмодатчиков приведены на рисунках 11-14.

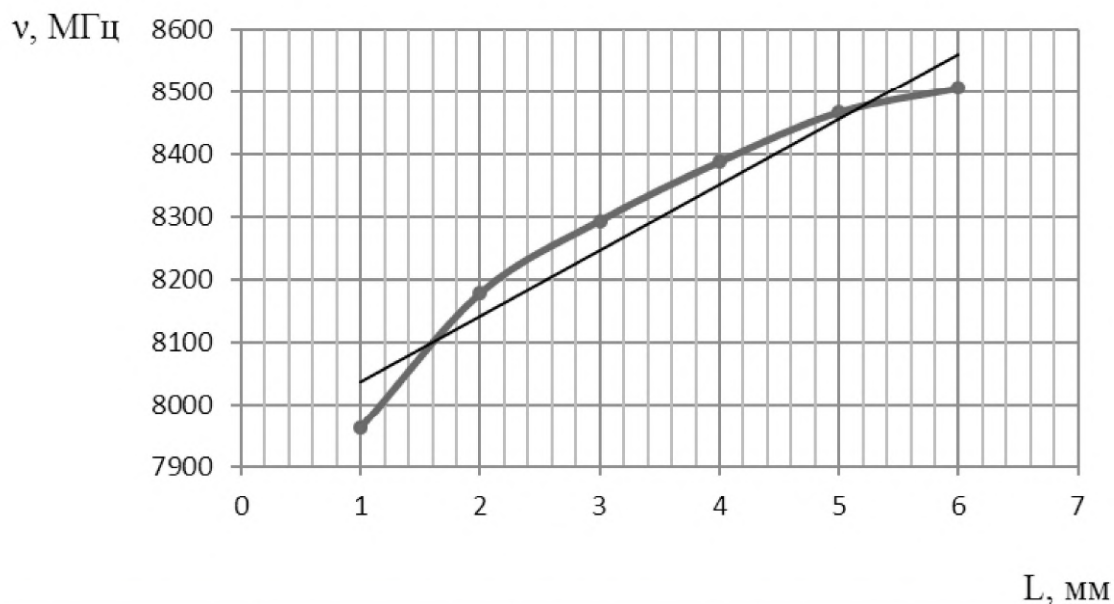


Рис. 11. Зависимость частоты генерации от длины резонатора для резонатора на волне  $TEM$

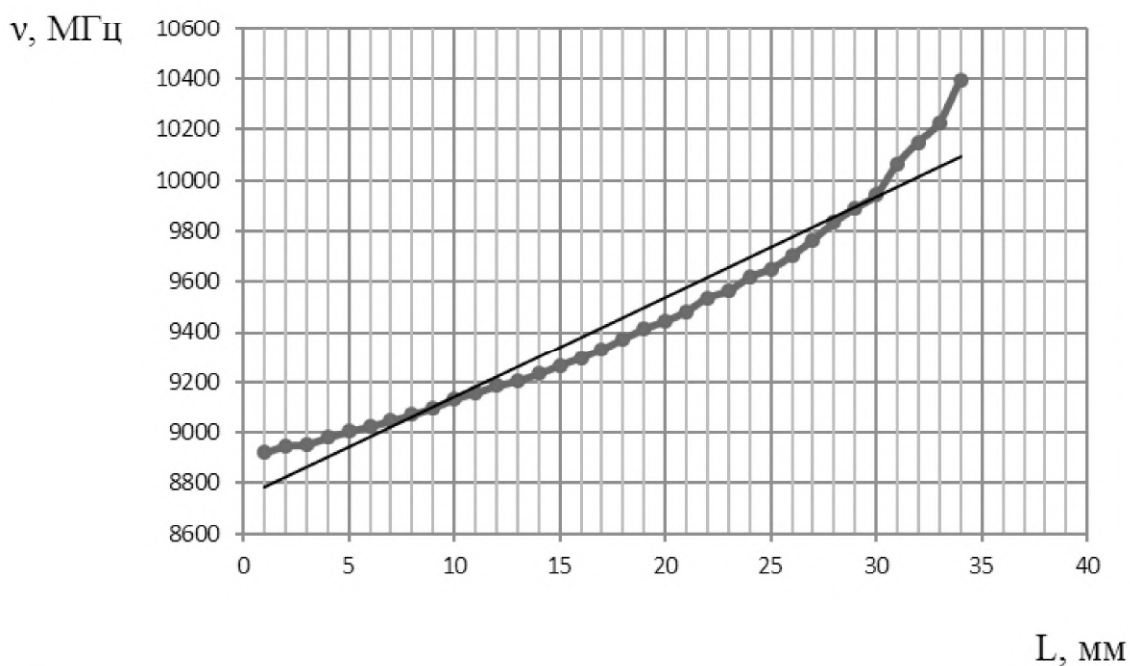


Рис. 12. Зависимость частоты генерации от длины резонатора для резонатора на волне  $H_{011}$



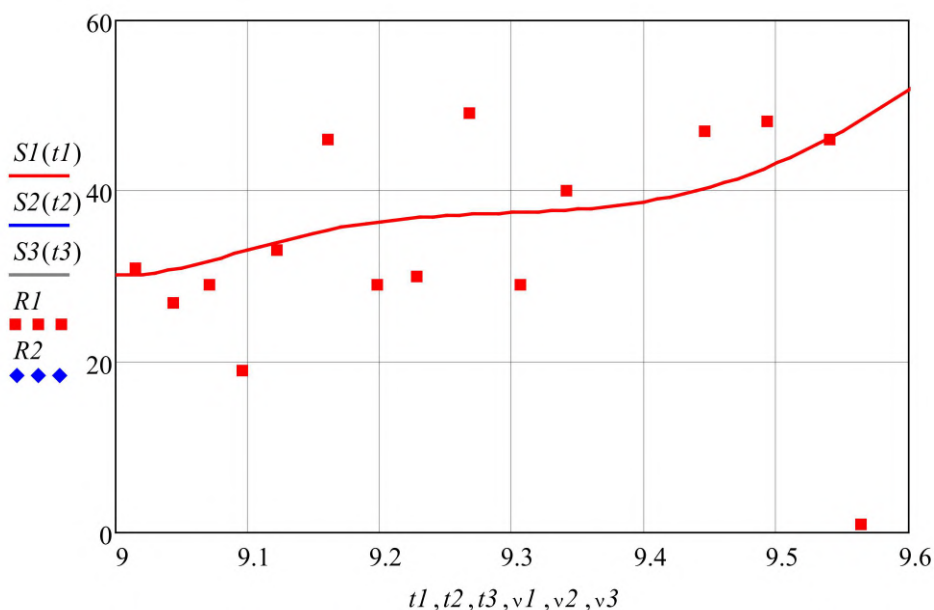


Рис. 13. График зависимости чувствительности  $S$  резонатора на волне  $TEM$  от частоты  $\nu$

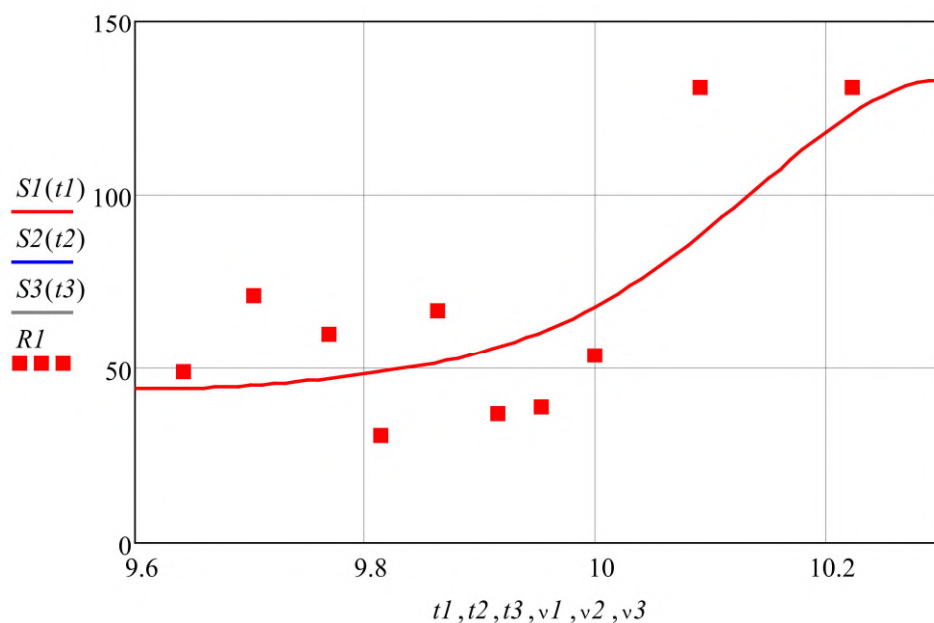


Рис. 14. График зависимости чувствительности  $S$  резонатора на волне  $H_{011}$  от частоты  $\nu$

На рисунках 11-12 приведены зависимости генерируемой частоты сейсмодатчиков от изменения длины резонатора (передвижение поршня вдоль коаксиальной линии). В результате аппроксимации зависимости имеют линейный характер. На рисунках 13, 14 приведены зависимости чувствительности при перестройке резонаторов. На рисунке 13 резонатор возбужден на виде колебаний  $TEM$ . На рисунке 14 – возбужден на волне типа  $H_{011}$ .

Из рисунков видно, что чувствительность не зависит от вида конструкции и практически остается постоянной.

## Заключение

1. Теоретические и экспериментальные исследования свойств СВЧ – преобразователей и традиционных электродинамических преобразователей путем анализа движения механических упругих измерительных систем показали, что одним из перспективных направлений совершенствования с целью адекватности записей реальным, истинным движениям той или иной физической системы является использование СВЧ – преобразователей.

2. Анализ результатов исследований показывает, что чувствительность СВЧ-преобразователя не зависит от вида конструкции и практически остается постоянной. Это указывает на перспективность использования СВЧ- преобразователя при изучении сейсмических, в том числе, динамических колебаний

3. Исследованные конструкции сейсмопреобразователей позволяют регистрировать колебания торцевой стенки резонаторов с амплитудой до 0,1 мкм, и, таким образом, применять подобные сейсмопреобразователи для систем изучения широкополосных сейсмической активности с малой амплитудой и прогнозирования разрушительных землетрясений, и обеспечивают формирование инвариантной зависимости измеряемых кинематических величин от информационных параметров.

4. Сравнительный анализ магниторезонансных, электростатических резонансных и совмещенных электромагнитных подвесов показал, что наименьшими инструментальными погрешностями при измерении кинематических величин обладает совмещенный электромагнитный подвес с использованием магнитов из закритических материалов, обеспечивающих подвесу высокую стабильность.

5. Впервые разработан способ расчета характеристик измерительных электромагнитных подвесов на основе совмещенных электромагнитных подвесов, с использованием магнитов из закритических материалов. При этом решены следующие задачи:

- определены условия адекватности намагничивания магнитно-мягких и магнитно-твердых тел напряженности намагничивающего поля;
- разработана математическая модель силовых взаимодействий элементов магнитной цепи;
- исследованы причины основных инструментальных погрешностей совмещенных электромагнитных подвесов и разработаны методы их компенсации;
- проведена оптимизация энергетических параметров магнитов из закритических материалов по их геометрическим размерам.

6. Созданы измерительные электромагнитные подвесы на основе совмещенных электромагнитных подвесов и разработаны образцы гравиметров, градиентометров и сейсмоприемников. Экспериментальные исследования разработанных устройств подтвердили обоснованность математических моделей и показали следующие положительные качества:

- в гравиметрах и градиентометрах: высокую механическую чувствительность и широкий диапазон измеряемых значений кинематических величин при одновременном уменьшении, в сравнении с механическими аналогами, размеров и массы; регулировку в больших пределах частоты собственных колебаний инерциальной массы, которая может быть использована в гравиметрах для уменьшения внешних возмущающих моментов, действующих с определенной частотой на измерительную систему прибора, и востребовано в градиентометрах – для регистрации сейсмических волн низкой частоты; технологичность конструкции механической ча-

сти перспективной модели гравиметра, позволяющей арретировать инерциальный элемент подвеса, в том числе в градиентометрах – для арретирования коромысла; надежность в эксплуатации, благодаря отсутствию механических упругих измерительных элементов;

– в сейсмоприемниках: трехкомпонентность при использовании одной инерциальной массы, самоориентацию по магнитному меридиану, высокую чувствительность ( $1,4 \cdot 10^4 \text{ В/м/с}$ ).

7. Создан оригинальный способ расчета основных технических характеристик магнитоэлектрического преобразователя сейсмоприемника с нелинейным распределением индукции магнитного поля в рабочем зазоре за счет усовершенствования способа расчета электродинамических преобразователей с линейным распределением индукции. Он позволил для сейсмоприемников на пассивных магнитных подвесах (ПМП) с использованием магнитов из закритических материалов:

– обеспечить линейность магнитной цепи ПМП;  
– получить максимальный коэффициент электромеханической связи, одновременно уменьшив размеры катушек и их сопротивлений;  
– рассчитать степень затухания каркасной и бескаркасной катушек;  
– провести компенсацию температурных инструментальных погрешностей преобразователя сейсмоприемника с учетом температурного коэффициента индукции постоянного магнита.

8. Разработаны и внедрены в производство в Пермской приборостроительной компании новые технологичные конструкции широкополосных высокочастотных и среднечастотных, вертикальных и горизонтальных сейсмоприемников на базе пассивных магнитных подвесов. Результаты сравнительных испытаний, проведенных изготовителем и полевыми геофизическими предприятиями в течение нескольких сезонов, показали преимущества разработанных конструкций по сравнению с их механическими аналогами по коэффициенту нелинейных искажений, амплитудно-частотному спектру, идентичности и надежности.

9. На основе конструкции трехкомпонентного самоориентирующегося сейсмоприемника разработана аппаратура и технология геоакустического каротажа в комплексе направленного бурения скважин.

10. Обобщение теоретических и экспериментальных исследований конструкций на базе совмещенного электромагнитного подвеса позволило разработать модель многофункционального геофизического устройства, которое может быть использовано для проведения мониторинговых работ при прогнозе землетрясений, подсчете запасов нефти и газа в продуктохранилищах.

Полученные результаты позволяют расширить область применения магнитных подвесов в геофизических устройствах, что, в свою очередь повысит точность поисковых и разведочных геофизических работ по поиску нефти, газа и других полезных ископаемых.

## Литература

1. А.с. № 862794 РФ Кл. НОЗ В 7/14. Генератор сверхвысоких частот. // А.В. Ширяев, В.С. Мерзлов (РФ) от 24.07.79.

2. Богомоллов И.А.. Микроволновый датчик колебаний с малыми амплитудами / И.А. Богомоллов, В.С. Мерзлов, А.В. Ширяев // Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования. – М., 1997. – с. 180-181.

3. Козырев Е.Н., Симакин А.Г. Разработка и исследование сейсмоприемника на основе объемного резонатора сверхвысоких частот датчиков с волной типа Но1. Материалы VI Международной конференции «Инновационные технологии для устойчивого развития горных территорий», Владикавказ, 2007.

DOI: 10.23671/VNC.2014.4.55481

## **HIGHLY SENSITIVE SEISMIC CONVERTER ON THE BASIS OF THE CAVITY RESONATOR OF SHF SHF**

**© 2014 E.N. Kozyrev, Techn. Sci. Doct., Prof., A.G. Simakin, Techn. Sci. Cand**

Center of the geophysical investigations of VSC RAS & RNO-A, 93a, Markov st.,  
Vladikavkaz, 362002, Russia, E-mail: vzaal@mail.ru

In the article are examined the results of investigating the generators of superhigh frequencies on the waves of the  $H_{01}$  and TEM type, utilized as the sensors for the registration and the measurement of weak seismic fluctuations.

The dependences of the separate characteristics of seismic receivers on the basis of cavity resonators on the  $H_{01}$  and TEM type waves are given

**Keywords:** cavity resonator of SHF, sensor of small displacements, seismic converter.