

УДК 53.087.92

## Применение сейсмодатчика MET1003 в экспериментальной технике

А. Д. Волков

*Рассмотрены возможности применения молекулярного сейсмодатчика MET1003 в экспериментальной технике. Датчик отличается рекордной чувствительностью, которая в 5–10 раз превосходит чувствительность пьезодатчиков и датчиков фирмы Bruel & Kjaer Vibro. Датчик позволяет получать точность регистрации амплитуды вибрации лучше 0,1 мкм и частоты — лучше 0,2 Гц в диапазоне частот 1–200 Гц. Рабочий диапазон температур монитора составляет от –40 до +50 °С. Благодаря высокой чувствительности и малым размерам датчик является привлекательным для применения в экспериментальной технике.*

PACS: 07.07.Df

*Ключевые слова:* вибрация, молекулярный сейсмодатчик, электролит, преобразовательная ячейка, спектр, Фурье-анализ.

### Введение

Современная номенклатура датчиков, их характеристики и области применения приведены в обзорах [1, 2].

Среди разработок выделяются сейсмические датчики нового поколения, разработанные компанией МИКРОАКС. Датчики отличаются высокой чувствительностью, широким частотным диапазоном и миниатюрным исполнением. Отличительной особенностью датчиков является использование электролита в качестве инерционной массы. В ячейке датчика вследствие внешнего механического воздействия происходит преобразование конвективного движения ионов электролита в электрический сигнал. Сигнал несет информацию об амплитуде и частоте вибрации. Специальные датчики этой компании позволяют измерять вращательное движение объекта в диапазоне углов  $\pm 15^\circ$ .

В работе проверялись возможности применения датчика MET1003 в области физического эксперимента. Необходимость в этом вызвана тем, что работа мощных ускорительных систем создает большие помехи по шинам земли и питания, которые будут имитировать сигнал вибрации. Рассеянное магнитное поле физических установок также может оказывать влияние на характеристики датчика. С другой стороны, в ряде случаев требуется

прецизионная стабильность положения детекторов и точность измеряемых величин. В этом случае знание источников вибрации помогает уменьшить их влияние и учесть величину вибрации при обработке физической информации.

### Конструкция и принципы работы MET1003

Молекулярный сейсмодатчик MET1003 содержит три ячейки регистрации для одновременного измерения скорости вибрации исследуемого объекта в направлении осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ортогональной системы координат. На рис. 1 показана структура ячейки [3].

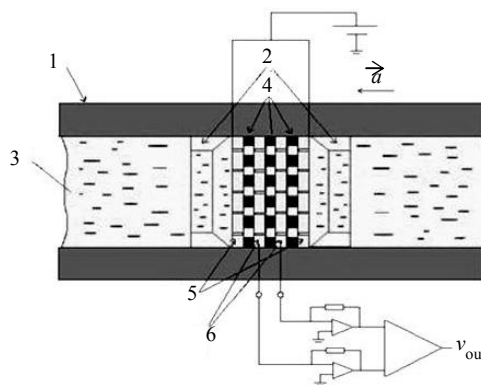


Рис. 1. Структура преобразовательной ячейки датчика MET1003:

1 — диэлектрическая трубка (корпус преобразователя); 2 — установочные элементы; 3 — электролит KOH; 5 и 6 — платиновые аноды и катоды, на которые подается постоянный потенциал смещения 12 В, между собой электроды разделяются диэлектрическими прокладками 4.

Электроды и мембраны имеют отверстия для протекания электролита под действием вибрации. Для того чтобы преобразователь мог использоваться в качестве линейного датчика движения, концы трубки закрываются эластичными мембранами, не показанными на рисунке.

Волков Александр Дмитриевич, научный сотрудник.

Объединенный институт ядерных исследований.

Россия, 141980, Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6.

Тел. 8 (49621) 63240. E-mail: volkov@nusun.jinr.ru

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2010 г.

Процесс преобразования вибрации в электрический сигнал протекает следующим образом [4]. При заполнении капилляров мембран электролитом на границе раздела жидкость—твердое тело ионы электролита формируют двойной электрический слой [5—7]. Часть зарядов слоя за счет теплового движения молекул находится в несвязанном состоянии. Под действием приложенного напряжения движение свободных ионов электролита в капиллярах мембраны образует ток, протекающий через катоды. Ток образуется вследствие окислительно-восстановительной реакции на электродах. При переменном движении электролита протекание тока связано с перезарядкой емкости двойного слоя. Ток с каждого катода стекает в нагрузку усилителя, формируя на выходе сигнал напряжения. Выходной усилитель формирует суммарный сигнал с катодов ячейки. В каждой паре анод—катод токи имеют противоположные направления, определяемые положением электродов. Это позволяет компенсировать диффузионную составляющую и выделить действие конвективной составляющей тока вследствие вибрации. В зависимости от направления перемещения инерционной массы электролита ток в одной паре электродов увеличивается, а в другой — уменьшается.

На рис. 2 приведено поведение коэффициентов преобразования  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  скорости вибрации объекта вдоль осей (м/с) в амплитуду выходного сигнала в зависимости от частоты вибрации  $f$ . Измерения коэффициентов проводились в диапазоне частот 0,3—120 Гц на специальном оборудовании [8]. По данным изготовителя, работоспособность датчика сохраняется до 300 Гц. В диапазоне частот 1—20 Гц коэффициенты преобразования  $K_x$ ,  $K_y$  имеют практически постоянную величину  $K = 550$  В·м/с, которая затем спадает со скоростью 3 В·Гц·с/м. Коэффициент преобразования вдоль вертикальной оси  $z$  имеет более сложную зависимость. В заданном частотном диапазоне коэффициент преобразования можно стабилизировать путем введения в схему формирования сигнала комплексной обратной связи. Рабочий диапазон температур монитора составляет от  $-40$  до  $+50$  °С. Угол наклона монитора относительно вертикальной оси  $z$  не должен превышать  $\pm 15^\circ$ .

### Испытания MET1003

Вибрация объектов ускорительной техники и влияние на датчик магнитного поля проверялись на фазотроне ЛЯП и циклотроне ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ. Необходимость контроля вибрации для обеспечения стабильного положения детекторов была продемонстрирована на примере микроскопа

для измерения треков частиц в фотоэмульсии эксперимента OPERA и оптического стола для проведения прецизионных опытов по гравитации и работе лазеров.

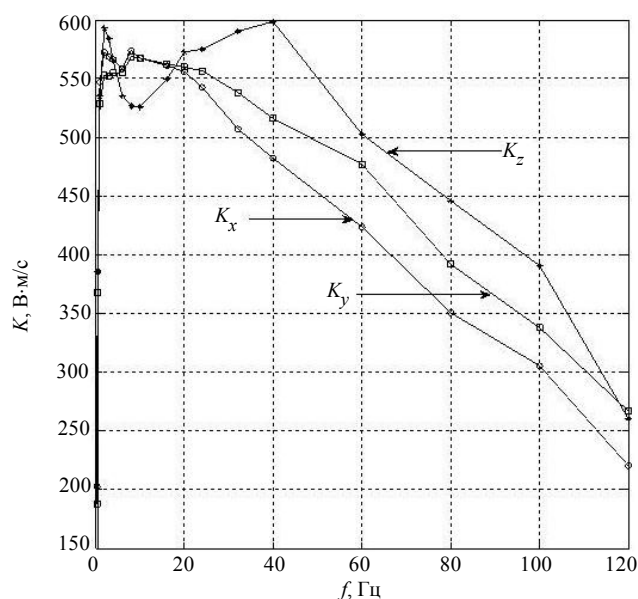


Рис. 2. Зависимость коэффициентов преобразования монитора

Обработка сигналов с датчика MET1003 включает оцифровку сигналов в течение промежутка времени и их Фурье-анализ, позволяющий определить частоту и амплитуду вибрации. При испытаниях датчика сигналы регистрировались с помощью цифрового осциллографа с возможностью Фурье-преобразования. Полученные осциллограммы удобны для экспресс-анализа и получения характеристик вибрации объектов. На приведенных ниже осциллограммах (рис. 3—5) луч 1 соответствует сигналу вибрации в горизонтальной плоскости в направлении осей монитора  $x$  или  $y$ , а луч 2 — сигналу вибрации в вертикальном направлении  $z$ . Амплитуда вибрации определяется по амплитуде сигнала монитора с учетом значения коэффициента преобразования на частоте вибрации. На развертке осциллографа амплитуда сигнала представлена по оси  $y$ , а время — по оси  $x$ . Следует отметить, что во избежание влияния помех металлический корпус датчика необходимо заземлять. Нестабильность источника питания монитора в 3 мВ приводит к имитации сигнала вибрации на частоте 50 Гц амплитудой 2,5 мкм, поэтому во время испытаний датчик питался от аккумулятора.

### Вибрация элементов ускорителей

Испытывалась вибрация электродвигателей и генераторов 5АП фазотрона ЛЯП. Основная частота вибрации электродвигателей составляет 15,8 Гц с

амплитудой колебаний 125 мкм в продольном направлении и 62,5 мкм в вертикальной плоскости, в которой присутствует вибрация на частоте 80 Гц с амплитудой 5 мкм. Осциллограмма вибрации генераторов 5АП показана на рис. 3.

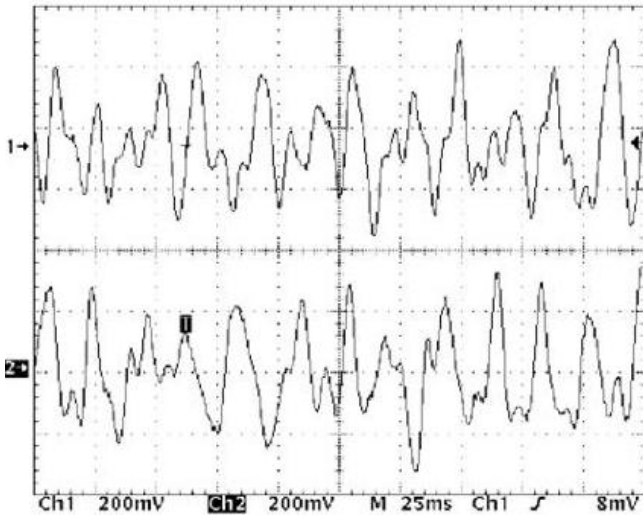


Рис. 3. Вибрация генераторов фазотрона ЛЯП

Вследствие биения подшипников качения вибрация генераторов носит нестационарный характер в обеих плоскостях и имеет меньшую амплитуду по сравнению с электродвигателем. Амплитуда вибрации составляет 5,2 мкм на частоте 50 Гц и 1,2 мкм на частоте 80 Гц. Регистрируемые биения подшипников приводят к их разрушению и к необходимости их периодической замены.

Влияние магнитного поля на работу датчика проверялось при измерении вибрации корпуса с расположенными внутри дуантами циклотрона

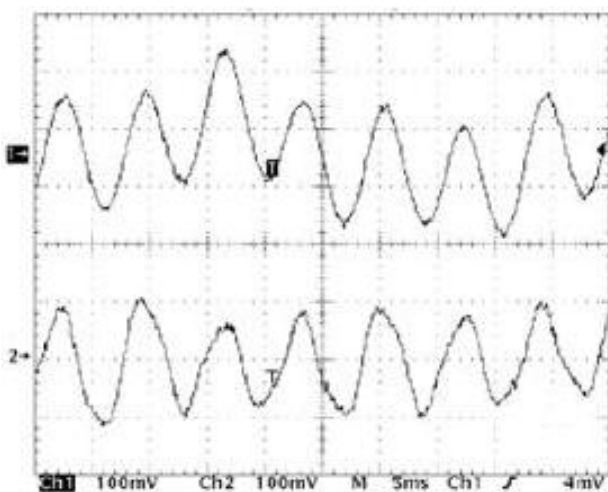
ИЦ-100 ЛЯР. В циклотроне происходит получение нужных для эксперимента ионов и их ускорение в дуантах магнитным полем величиной 1,96 Тл. Осциллограммы вибрации корпуса с установленными в нем дуантами приведены на рис. 4. В отсутствие магнитного поля (рис. 4, а) основная частота вибрации корпуса составляет 141 Гц амплитудой 1,3 мкм.

Измерения показали, что большое рассеянное магнитное поле циклотрона оказывает влияние на амплитуду вибрации и не влияет на ее частоту (рис. 4, б). Амплитуда уменьшилась до 0,95 мкм, при этом процесс вибрации стал стационарным. Регистрируемая датчиком частота 141 Гц вызвана работой вакуумных насосов и с точностью 1,2 % совпадает с их паспортными данными.

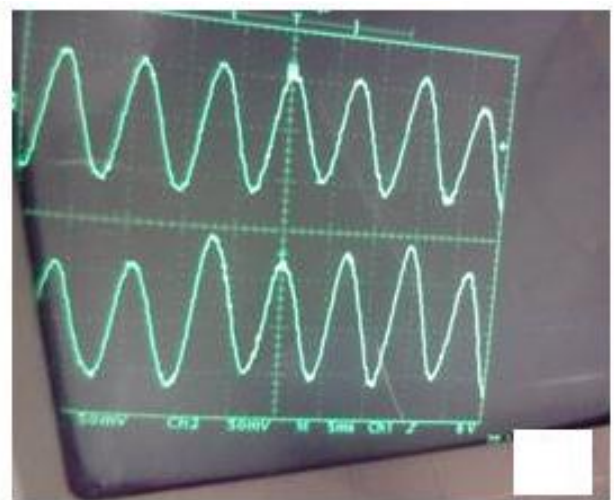
### Прецизионный контроль положения

Измерялась вибрация микроскопа для сканирования треков частиц в фотоэмульсии эксперимента OPERA. Измерение коротких следов трека в фотоэмульсии требуется делать с точностью лучшей размера гранул эмульсии, который составляет 0,3 мкм. Во избежание вибрации микроскоп помещен на специальное виброустойчивое основание, расположенное в земле и не связанное с корпусом здания. В измерительном помещении поддерживается постоянный микроклимат. Процесс измерения автоматизирован.

Несмотря на принятые меры, работа систем управления микроскопом оказывает заметное влияние на величину его вибрации.



а



б

Рис. 4. Вибрация корпуса расположения дуантов:

а — компьютерная обработка сигнала; б — экран цифрового осциллографа

На рис. 5 показана осциллограмма сигнала вибрации измерительного стола микроскопа. Низкочастотная вибрация 6,7 Гц в горизонтальной плоскости имеет амплитуду 1,3 мкм. Вертикальная вибрация 50 Гц обусловлена работой системы пневматики и имеет амплитуду 0,5 мкм. При работе кондиционера амплитуда составляющей 50 Гц увеличивается до 0,8 мкм и появляется горизонтальная вибрация амплитудой 0,15 мкм.

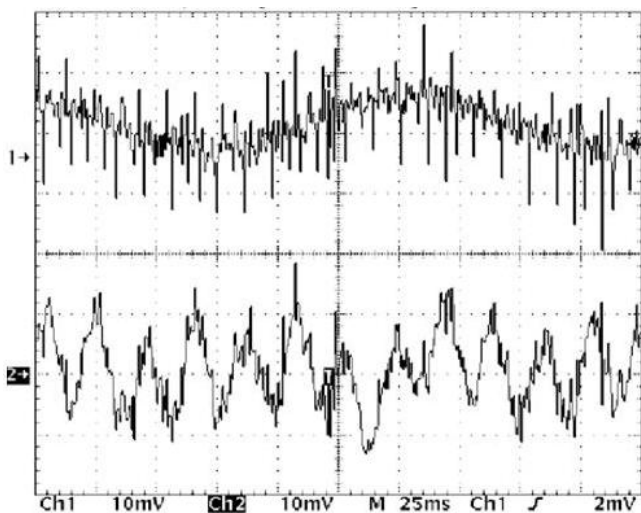


Рис. 5. Вибрация стола микроскопа

Возможной причиной влияния работы различных систем может быть общее покрытие пластиком пола и основания под микроскопом, передающим вибрацию. Особенностью работы микроскопа является ударное воздействие на координатный столик, которое оказывает включение его отдельных систем. Оно характеризуется наличием больших выбросов на сигнале горизонтальной вибрации. Амплитуда выбросов пропорциональна величине смещения, которое, по оценкам, достигает 0,5 мкм.

Проведенные измерения показывают, что вибрация превышает требования к точности измерения трека, поэтому необходимо учитывать ее влияние. Для этого требуется наличие двух мониторов и одновременное измерение вибрации координатного стола микроскопа относительно системы измерения координат трека.

Аналогичные измерения вибрации были проведены на antivибрационном стенде ЛЯП, который служит для исследований по гравитации и работе лазеров. Они также показали неэффективную работу antivибрационной защиты. Низкочастотная вибрация 6,7 Гц имеет одинаковую амплитуду 3,5 мкм для стенда и пола на расстоянии 30 см от края стенда. Ее действие в обоих случаях связано с работой насосов, обеспечивающих водоснабжение. Учет вибрации стола при изучении особенностей распространения лазерного луча в воздушной

среде поможет авторам [9] более точно исследовать наблюдаемый эффект фокусировки луча. Декларируемая авторами точность фокусировки в 0,25 мкм получена без учета влияния вибрации.

## Заключение

Результаты испытаний подтвердили возможность эффективного использования монитора МЕТ1003 в технике физического эксперимента. Монитор отличается рекордной чувствительностью в частотном диапазоне 1—200 Гц, позволяющей измерять вибрацию элементов установок в экспериментах на ускорителях, а также осуществлять прецизионный контроль положения детекторов. Контроль положения особенно важен для микростриповых детекторов, используемых для целеуказания точки взаимодействия частиц в исследуемых процессах.

Применение 16-битных АЦП для оцифровки измеряемых сигналов дает возможность получить точность регистрации амплитуды вибрации меньше 0,1 мкм. Частотный анализ измеряемого спектра выполняется с точностью лучше 0,2 Гц, что подтверждается результатами измерений. Представляет интерес исследование влияния величины магнитного поля на коэффициент преобразования монитора.

Проверка показала необходимость заземления датчика и тщательной экранировки сигнальных выводов от наводок. Во избежание имитации вибрации на частоте 50 Гц, связанной с нестабильностью источника питания, монитор следует питать от аккумулятора или источника с пульсацией менее 100 мкВ. Для удобства крепления монитора к металлическим объектам его корпус требуется оснастить магнитной защелкой для надежной связи с исследуемым объектом. Благодаря миниатюрному корпусу МЕТ1003 на его базе возможна организация переносной лаборатории по контролю вибрации объектов.

*Автор выражает благодарность  
В. М. Агафонову и И. В. Егорову  
за предоставленный для тестов монитор  
и обсуждение результатов проверки.*

## Литература

1. Егоров А. А. // Журнал радиоэлектроники. 2009. № 3.
2. Егоров А. А., Егоров М. А., Царев Ю. И. Химические сенсоры: классификация, принципы работы, области применения. [www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-01-14-001.pdf](http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-01-14-001.pdf)
3. <http://r-sensors.ru>

4. Лидоренко Н. С., Ильин Б. И., Зайденман И. А. Введение в молекулярную электронику. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Левин А. И. Теоретические основы электрохимии. — М., 1963.
6. Богорицкий В. С. Основы электрохимии. — М.: Химия, 1988.
7. Сопин Ю. К., Копт В. Я., Чулкин А. А. Модели комбинированных молекулярно-электронных преобразователей

диффузионно-кинетического типа: Сб. тр. СНУЯЭП. 2009. С. 164.

8. Egorov E. V., Kozlov V. A., Yashkin A. V. // Russian Journal of Electrochemistry. 2007. V. 43. No. 12. P. 1436.

9. Батусов В. Ю., Будагов Ю. А., Ляблин М. В., Сисакян А. Н. Наблюдение особенностей распространения лазерного луча в воздушной среде со стоячими звуковыми волнами. Препринт ОИЯИ Р13–2009–45, Дубна, 2009.

## Using the MET1003 seismic detector in experimental equipment

A. D. Volkov

Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, Joint Institute for Nuclear Research,  
6 Joly Curie str., Dubna, 141980, Russia  
E-mail: volkov@nusun.jinr.ru

*A possibility of using the MET1003 molecular seismic detector in experimental equipment is examined. The detector is characterized by a high sensitivity, which is 5–10 times higher than the sensitivity of piezoelectric sensors and Bruel & Kjaer Vibro transducers. The MET1003 monitor allows detection of the vibration frequency accurate to better than 0.2 Hz and amplitude accurate to better 0.1  $\mu\text{m}$  in the range 1 to 200 Hz. Working temperature range of the detector is  $(-40\div+50)$  °C. Owing to its high performance and small size, the detector has a wide field of application. The investigation has been carried out at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, Joint Institute for Nuclear Research.*

PACS: 07.07.Df

*Keywords:* vibration, molecular seismic detector, the electrolyte, detection cell, spectrum, Fourier series.

Bibliography — 9 references.

Received December 23, 2010