

P13-2010-132

А. Д. Волков

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЙСМОДАТЧИКА МЕТ1003
В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Направлено в журнал «Прикладная физика»

Волков А. Д.

P13-2010-132

Применение сейсмодатчика MET1003
в экспериментальной технике

Рассмотрены возможности применения молекулярного сейсмодатчика MET1003 в экспериментальной технике. Чувствительность датчика в 5–10 раз превосходит чувствительность пьезодатчиков и датчиков фирмы «Brueel & Kjaer Vibro». Сейсмодатчик 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 $-40 \div +50$ °С. Благодаря высокой чувствительности и малым размерам датчик обладает широким спектром применения.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Volkov A. D.

P13-2010-132

The Use of the MET1003 Seismic Detector
in Experimental Equipment

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 Brueel & Kjaer Vibro transducers. The MET1003 monitor allows detection of the vibration frequency accurate to better than 0.2 Hz and amplitude accurate to better than 0.1 μm in the range 1 to 200 Hz. Working temperature range of the detector is $-40 \div +50$ °С. Owing to its high sensitivity and small size, the detector has a wide field of application.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

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 МЕТ1003 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 оценка источников вибрации помогает уменьшить их влияние и учесть величину вибрации при обработке физической информации.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ МЕТ1003

Молекулярный сейсмотатчик МЕТ1003 содержит три ячейки регистрации для одновременного измерения скорости вибрации исследуемого объекта в направлении осей x, y, z ортогональной системы координат. На рис. 1 [3] показана структура ячейки: 1 — диэлектрическая трубка (корпус преобразователя); 2 — установочные элементы; 3 — электролит КОН; 5 и 6 — платиновые аноды и катоды, на которые подается постоянный потенциал смещения 12 В. Между собой электроды разделяются диэлектрическими

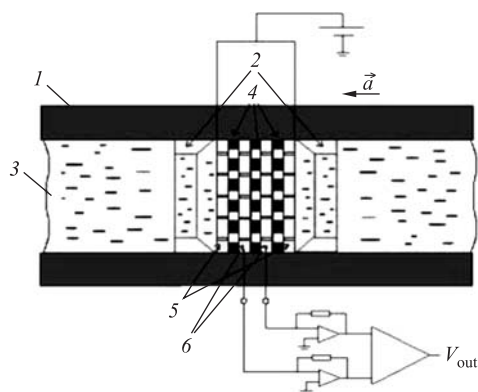


Рис. 1. Структура ячейки датчика MET1003

прокладками 4. Электроды и прокладки имеют отверстия для протекания электролита под действием вибрации. Для того чтобы преобразователь мог использоваться в качестве линейного датчика движения, концы трубки закрываются эластичными мембранами.

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 паре уменьшается.

На рис. 2 приведено поведение коэффициентов преобразования K_x , K_y , K_z скорости вибрации объекта вдоль осей в амплитуду выходного сигнала в зависимости от частоты вибрации f . Измерения коэффициентов проводились на сертифицированном оборудовании [8] в диапазоне частот 0,3–120 Гц. По данным изготовителя работоспособность датчика сохраняется до 300 Гц.

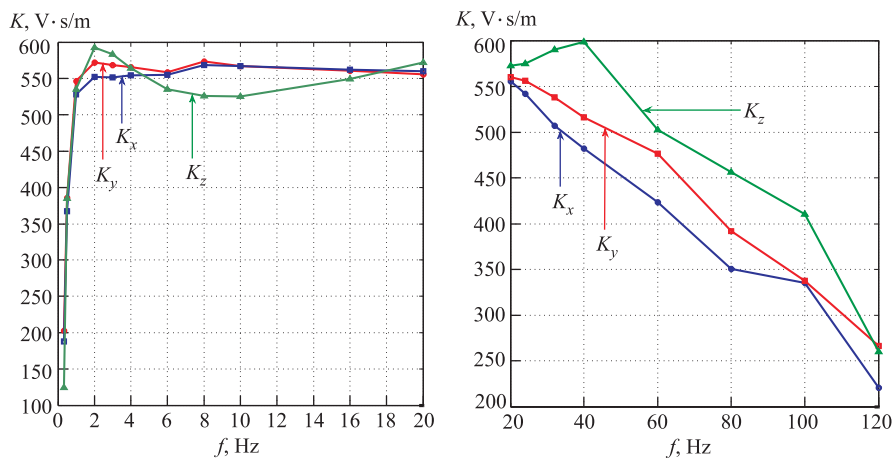


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента преобразования

В диапазоне частот 1–20 Гц коэффициенты преобразования K_x , K_y имеют практически постоянную величину 550 В · с/м, которая затем спадает со скоростью 3 В · Гц · с/м. Коэффициент преобразования K_z вдоль вертикальной оси z имеет более сложную зависимость. В определенном частотном диапазоне коэффициент преобразования можно стабилизировать путем введения в схему формирования сигнала комплексной обратной связи. Рабочий диапазон температур монитора составляет $-40 \div +50$ °С. Угол наклона монитора относительно вертикальной оси z не должен превышать 15° .

ИСПЫТАНИЯ МЕТ1003

Вибрация объектов ускорительной техники и ее 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 и оптического стола для проведения прецизионных опытов по гравитации и работе лазеров.

Обработка сигналов с датчика МЕТ1003 включает оцифровку сигналов в течение определенного промежутка времени и их фурье-анализ, позволяющий найти 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 далее ос-

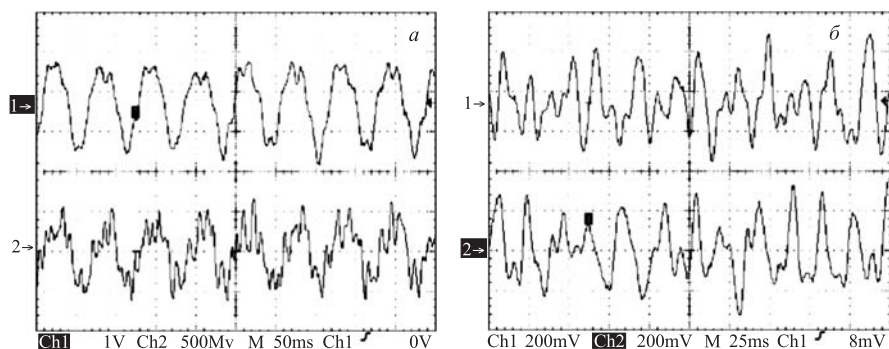


Рис. 3. Вибрация элементов фазотрона ЛЯП

циллограммах (см. рис. 3–8) 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 , 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 ускорителя. На рис. 3, *a* приведена осциллограмма вибрации электродвигателей, а на рис. 3, *б* — 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 менее 5 мкм. Вибрация генераторов 5АП носит нестационарный характер в обеих плоскостях и имеет меньшую амплитуду по сравнению с электродвигателем. Генератор имеет вибрацию амплитудой 5,2 мкм на частоте 50 Гц и 1,2 мкм на частоте 80 Гц. Наблюдаемые биения генератора приводят к разрушению его подшипников и необходимости их периодической замены.

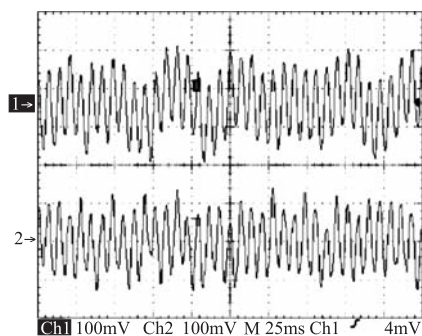


Рис. 4. Вибрация корпуса расположения источника ионов

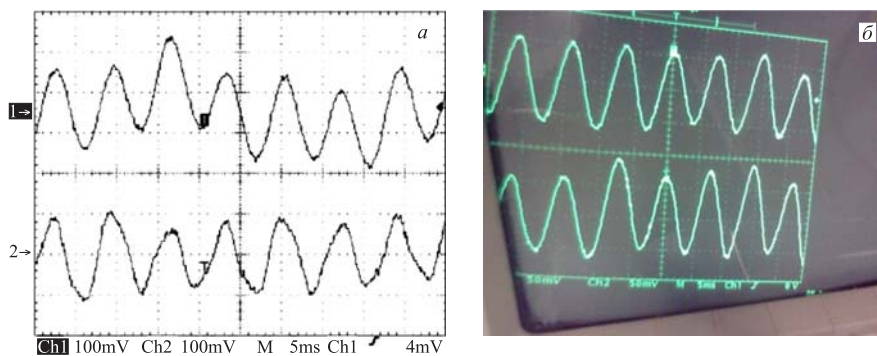


Рис. 5. Вибрация корпуса с дуантами циклотрона ИЦ-100

На рис. 4 приведена осциллограмма вибрации корпуса, в котором расположен ионный источник циклотрона ИЦ-100 ЛЯР. Ионы источника поступают в дуанты, где осуществляется их ускорение в магнитном поле напряженностью 1,96 Тл. Корпус, где расположен источник, подвержен вибрации на частотах 141 Гц амплитудой 1,6 мкм и 21 Гц амплитудой 3,5 мкм. В вертикальной плоскости присутствует составляющая 50 Гц с амплитудой 1,7 мкм.

Вибрация корпуса с дуантами показана на рис. 5. В отсутствие магнитного поля (рис. 5, 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. Частота вибрации при включении поля не изменилась, а амплитуда вибрации уменьшилась до 0,95 мкм (рис. 5, б). При этом процесс вибрации стал стационарным, что указывает на влияние магнитного поля на процесс вибрации. Регистрируемые датчиком частоты 21 и 141 Гц вызваны работой вакуумных насосов и с точностью 1,2 % совпадают с их «паспортными» данными.

Прецизионный контроль положения. Измерялась вибрация микроскопа при сканировании 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.

На рис. 6 показаны осциллограммы сигнала вибрации измерительного стола микроскопа. Низкочастотная вибрация 6,7 Гц в горизонтальной плоскости на рис. 6, а имеет амплитуду 1,3 мкм. Вертикальная вибрация 50 Гц

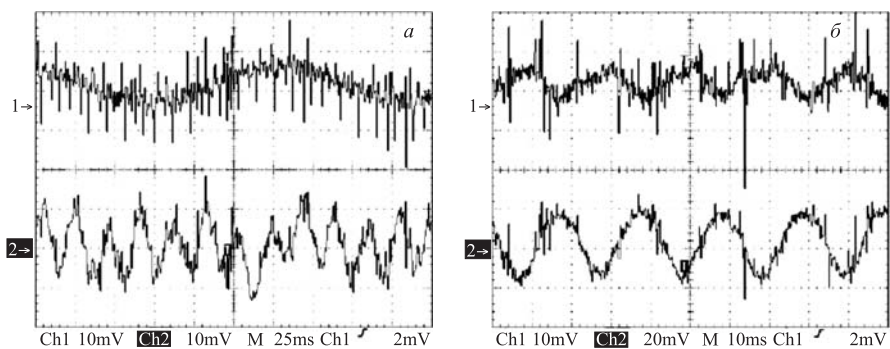


Рис. 6. Вибрация стола микроскопа

обусловлена работой системы пневматики и имеет амплитуду 0,5 мкм. При работе кондиционера амплитуда колебаний увеличивается до 0,8 мкм и появляется горизонтальная вибрация амплитудой 0,15 мкм (рис. 6, б).

Возможной причиной влияния работы различных систем может быть общее покрытие пола и основания под микроскопом — пластик, передающий вибрацию. Особенностью работы микроскопа является ударное воздействие на координатный столик, которое вызывает 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 столика микроскопа относительно системы измерения координат трека.

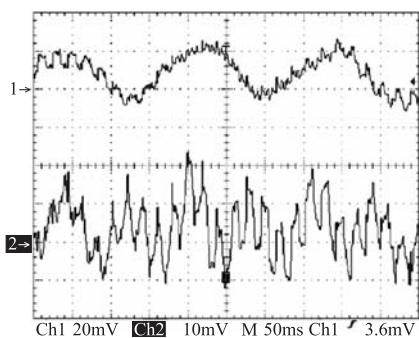


Рис. 7. Вибрация поверхности пола

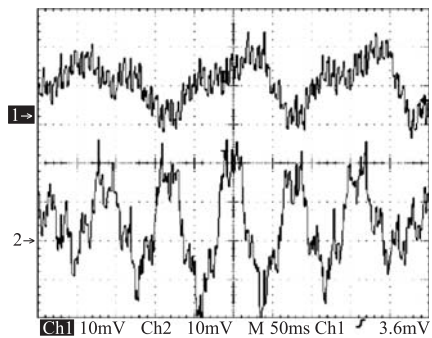


Рис. 8. Вибрация стола станда

Примером необходимости учета влияния вибрации служат и исследования по гравитации и работы лазеров, проводимые на антивибрационном стенде ЛЯП. Стенд имеет специальную защиту от вибрации и не связан с корпусом здания. Аппаратура для исследований располагается на поверхности стола стенда. На рис. 7 для сравнения показана осциллограмма сигнала вибрации пола вблизи края рабочей поверхности стола. В горизонтальной плоскости пола есть вибрация на частоте 6,7 Гц амплитудой 3,5 мкм и 50 Гц амплитудой 0,16 мкм. В вертикальной плоскости амплитуда вибрации на частоте 50 Гц возрастает до 0,32 мкм и присутствует составляющая с частотой 12,6 Гц и амплитудой 0,8 мкм. Сигналы вибрации поверхности стола стенда показаны на рис. 8.

Амплитуда горизонтальной составляющей 6,7 Гц остается практически неизменной. При этом более четко проявляется вибрация на частоте 100 Гц с амплитудой 0,1 мкм. Основная частота вертикальной вибрации стола составляет 12,6 Гц амплитудой 3,2 мкм. 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 вибрации стола.

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, использующихся для целеуказания точки взаимодействия частиц в исследуемых процессах. Применение 16-битных АЦП для оцифровки измеряемых сигналов дает возможность получить точность регистрации амплитуды вибрации лучше 0,1 мкм. Частотный анализ измеряемого спектра выполняется с точностью лучше 0,2 Гц, что подтверждается результатами измерений.

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, следует применять аккумулятор или источник 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.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Егоров А. А.* Систематика, принципы работы и области применения датчиков // 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
3. <http://r-sensors.ru>
4. *Лидоренко Н. С., Ильин Б. И., Зайденман И. А.* Введение в молекулярную электронику. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 165–171.
5. *Левин А. И.* Теоретические основы электрохимии. М., 1963. С. 199–234.
6. *Богорицкий В. С.* Основы электрохимии. М.: Химия, 1988. С. 80–83, 236–244.
7. *Сопин Ю. К., Копн В. Я., Чуклин А. А.* Модели комбинированных молекулярно-электронных преобразователей диффузионно-кинетического типа: Сб. тр. СНУЯЭП. 2009. С. 164–173.
8. *Egorov E. V., Kozlov V. A., Yashkin A. V.* Phase-Response Characteristics of the Transfer Function of a Spatially Limited Electrochemical Cell // Russian Journal of Electrochemistry. 2007. V. 43, No. 12. P. 1436–1442.
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.

Получено 23 ноября 2010 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 16.03.2011.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 0,85. Тираж 305 экз. Заказ № 57269.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/