

Снятое угловое распределение амплитуды представляет собой окружность. Полученное отклонение от правильной окружности может быть связано с изменением качества акустического контакта при проведении измерений. В целом полученный результат свидетельствует том, что характер движения частиц среды в излученной волне близок к круговому. Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали возможность излучения циркулярно поляризованных волн с помощью преобразователя предложенной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2392625 Российская Федерация. Способ измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько.
2. Пат. 2397445 Российская Федерация. Чувствительный элемент гироскопа / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько.
3. Пат. 2426132 Российская Федерация. Способ и устройство для измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько, С. Ю. Шевченко.
4. Пат. 2457436 Российская Федерация. Устройство для измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, А. Н. Перегудов, А. А. Поженская, М. М. Шевелько.
5. Пат. 2460078 Российская Федерация. Способ измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, А. Н. Перегудов, А. А. Поженская, М. М. Шевелько.
6. Грибкова Е. С., Перегудов А. Н., Шевелько М. М. Особенности распространения объемных акустических волн во вращающихся твердых средах // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. № 1. С. 53–59.
7. Gribkova E., Peregudov A., Shevelko M. Theoretical and Experimental Researches of Bulk Acoustic Wave's Availability in Angular Motion Sensors (Теоретические и экспериментальные исследования возможности применения объемных акустических волн в сенсорах углового движения) // Proceedings of the IEEE Russia. NorthWestsection. 2011. Vol. 1. P. 69–72.
8. Исследование возможности использования акустических волн в датчиках вращения / Е. С. Грибкова, А. А. Поженская, А. И. Лутовинов, С. А. Похорюков, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько // Сб. докл. 65-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2012. С. 184–187.
9. Лямов В. Е. Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах. М: Изд-во Моск. ун-та, 1983.

A. I. Lutovinov, A. N. Peregudov, M. M. Shevelko

ULTRASONIC CIRCULAR POLARIZED WAVE TRANSDUCER. THEORY AND EXPERIMENT

The theoretical basis of circular polarized acoustic waves excitation is considered. The new design of circular polarized wave sensor is proposed. In device experimental researches qualitative results are obtained, which show the nature of the particles circular motion in the wave emitted by the proposed design transmitter.

Ultrasonic transducer, bulk waves, circular polarization, circularly polarized acoustic wave

УДК 004.358

М. С. Коровина

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ МЭМС-ДАТЧИКИ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО САМОХОДНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассмотрены вопросы применения трехкомпонентных МЭМС-датчиков для диагностики технического состояния металлоконструкций специального самоходного подвижного состава. Произведено виртуальное моделирование поведения исследуемой конструкции под воздействием внешних нагрузок с помощью расчетного модуля Simulation в программной среде SolidWorks с целью определения наиболее оптимальных мест установки датчиков.

МЭМС-датчики, программная среда SolidWorks, мониторинг технического состояния, частотный анализ

Мониторинг технического состояния специального самоходного подвижного состава (ССПС) является необходимым условием обеспечения безопасности движения поездов.

Современные системы мониторинга позволяют получать, накапливать и анализировать данные о состоянии путевых машин в реальном времени. Информация, получаемая системой непосредственно от объекта наблюдения, должна быть максимально полной и достоверной: недостаточность и/или искажение данных с высокой вероятностью приведет к неверным заключениям о текущем и будущем техническом состоянии машины. Поэтому при проектировании систем мониторинга ССПС особое внимание следует уделять выбору устройств измерения контролируемых величин.

Одним из методов контроля технического состояния ССПС является диагностика напряженно-деформированного состояния (НДС) металлоконструкций машин и механизмов. Метод заключается в измерении одного из наиболее информативных параметров, характеризующих НДС металлоконструкций, – количества энергии, отдаваемой объектом диагностики в окружающее пространство. Количество энергии, отдаваемой в окружающее пространство можно контролировать акустическими и магнитными методами, а также на основе их совместного применения. Данный метод диагностики позволяет определить прочностные (включая анизотропные) параметры материалов в функции внешних возмущений или собственных динамических свойств и выявить тенденции к образованию усталостных разрушений.

На ремонтных предприятиях ОАО «РЖД» акустические и магнитные методы контроля, в частности вибродиагностика, используются при определении технического состояния ходовых частей ССПС (подшипников буксовых узлов, тележек вагонов, колесно-моторных блоков). Анализ сигналов виброускорения, зарегистрированных пьезоакселерометрическими датчиками в критических точках обследуемых конструкций, позволяет оперативно и с минимальными трудозатратами выявлять дефекты ходовых частей. Например, при формировании колесной пары качество деталей устанавливается при помощи анализа частотного спектра сигналов, полученных при ударном воздействии на оси и колеса; после монтажа буксовых узлов происходит виброакустическая проверка колесной пары на стенде (рис. 1), позволяющая выявить дефекты подшипников, качество смазки и недостатки монтажа. Колесная пара, успешно прошедшая проверку, устанавливается на тележку; затем на стенде производится вибродиагностика буксовых узлов тележки в сборе в условиях имитации рабочих скоростей и нагрузочных режимов. Результаты вибродиагностики поступают в единые дорожные диагностические центры (ЕДЦ) в реальном времени; после обработки информации выносится окончательное заключение о возможности установки тележки под вагон.

При проведении измерений обычно применяются одноканальные скалярные датчики. Главный недостаток таких датчиков заключается в отсутствии возможности определения величины и направления пространственного вектора измеряемого параметра (виброускорения, виброперемещения,



Рис. 1

напряжённости магнитного поля рассеяния), поскольку регистрируется только значение проекции вектора на измерительную ось [1]–[5]. Оценка состояния конструкции только по одной из осей проекции вектора приводит к неверным заключениям о его текущем динамическом состоянии и, как следствие, к ошибкам прогнозирования. Одновременное использование нескольких одноканальных датчиков, измерительные оси которых ориентированы в различных направлениях, не решает проблему из-за фазовой рассогласованности измерений.

Составить достоверную картину НДС объекта диагностики позволяют трехкомпонентные векторные преобразователи, обеспечивающие синфазность (синхронность) измерений по трем ортогональным проекциям вектора измеряемого параметра в критических местах исследуемой конструкции. Результаты измерений образуют массив векторных величин виброускорения, виброперемещения или магнитного поля рассеяния, на основании которых строятся пространственно-временные годографы, позволяющие сделать выводы о наличии дефектов в материале конструкции. Форма годографов определяется прочностными свойствами материала и геометрией поперечного сечения несущего элемента конструкции. Так, при пространственной анизотропии прочности в критической точке исследуемого объекта годограф виброперемещения имеет форму пространственного эллипсоида, формирующие точки которого – декартово произведение множеств развернутых во времени синфазных измерений мгновенных проекций амплитуд колебаний измерительной точки. Параметры осей эллипсоида зависят от динамических свойств конструкции. По форме эллипсоида можно качественно оценить причины повышенных вибраций. Соотношение осей дает представление о разноподатливости – анизотропии прочности. Вследствие разнопрочности, или различия модулей упругости, размеры осей эллипсоида соответствуют абсолютным перемещениям измерительной точки. Малая ось эллипсоида соответствует абсолютным колебаниям измерительной точки в направлении минимальной податливости материала, большая ось – абсолютным колебаниям измерительной точки в направлении максимальной податливости (анизотропия податливости материала является следствием анизотропии прочности). Оси проекции эллипсоида соответствуют проекциям амплитуд абсолютной вибрации на плоскости ортогональной системы координат. В зависимости от прочностных свойств объекта, а также пространственной ориентации датчика и характера воздействия на объект проекции эллипсоида могут трансформироваться в окружности или в прямые линии. Например, для изотропных объектов форма годографа – окружность, что позволяет сделать вывод о равнопрочности или равенстве модулей упругости в ортогональных направлениях [6].

Для решения задач мониторинга состояния машин и механизмов были исследованы возможности двух микросхем компании «STMicroelectronics» LSM303DLHC и L3GD20*, относящихся к компонентам микроэлектромеханических систем (МЭМС) [7].

LSM303DLHC – цифровая микросхема «STMicroelectronics», сочетающая в одном корпусе трёхосевые акселерометр и магнитный датчик с низким собственным потреблением, что отвечает требованию рынка интеллектуальных систем распознавания положения и движения, работающих от батарей.

* См. официальный сайт компании «STMicroelectronics».

Цифровой магнитный датчик создан на основе магниторезистивной технологии компании «Honeywell» (Anisotropic Magneto-Resistive – AMR). Технология AMR имеет высокую точность измерения магнитного поля по всем осям (x, y, z), что устраняет необходимость в концентраторах магнитного потока, как это требуется в случае использования датчиков Холла из-за потери смещения при намагничивании датчика. Повышенная точность измерения МЭМС микросхемы LSM303DLHC дополнена такими функциями, как wake-up/power-down и 6D-измерениями, которые сигнализируют о перемещениях микросхемы по всем трем осям (x, y, z). Кроме того, конструкция датчика выполнена по технологии «Honeywell» и содержит цепь компенсации смещения, уменьшая потребность в калибровке. Запатентованные линии SET/RESET для размагничивания чувствительного элемента при каждом измерении повышают точность измерений.

Основные характеристики микросхемы LSM303DLHC: 3 канала измерения напряженности магнитного поля; 3 канала измерения линейного ускорения; диапазоны измерения напряженности магнитного поля: $\pm 1.3/\pm 1.9/\pm 2.5/\pm 4.0/\pm 4.7/\pm 5.6/\pm 8.1$ Гс; диапазоны измерения ускорения: $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$; 16-разрядный формат выходных данных; последовательный I2C-интерфейс (100 или 400 кГц); напряжение питания аналоговой части: 2.16...3.6 В; режимы экономии энергии; 2 независимых программируемых генератора прерываний для определения свободного падения и движений; встроенный датчик температуры; встроенный буфер FIFO; определение 6D/4D-ориентации; температурный диапазон: $-40 \dots +85$ °C; корпус LGA-14 (3×5×1 мм).

«STMicroelectronics» недавно представила интеллектуальное программное обеспечение, обрабатывающее и фильтрующее данные с выходов 3-координатных акселерометров, гироскопов и магнитных датчиков. Обработка этих данных сложными алгоритмами iNEMO™ значительно повышает характеристики точности и эффективности датчиков. Микросхема LSM303DLHC сочетает в себе высокую точность, чувствительность к линейному и магнитному перемещению по всем трем осям, корпус размером 3×5×1 мм и потребляемый ток не более 110 мкА при превосходной стабильности по времени и температуре. Кроме того, она обладает множеством дополнительных функций, таких как система 4D/6D определения ориентации в пространстве и два программируемых сигнала прерывания, позволяющих немедленно уведомить об обнаружении движения, свободном падении и мн. др.

Компания «STMicroelectronics» также производит 3-осевой МЭМС-гироскоп L3GD20 с цифровым интерфейсом. Резонансная частота L3GD20 смещена за пределы звукового диапазона, поэтому вибрационные колебания, передающиеся через печатную плату, не вносят значительных изменений в полезный сигнал сенсора. Новая технология изготовления чувствительного элемента сводит к минимуму явление кроссчувствительности, а также улучшает температурную стабильность параметров прибора, повышая его точность и надежность.

L3GD20 имеет регулируемый динамический диапазон от ± 250 до ± 2000 °/с. Данные выдаются в последовательную шину в виде 16-битного слова. Характерной особенностью сенсора являются настраиваемые внутренние фильтры низких и высоких частот. Для приложений с пониженным энергопотреблением сенсор поддерживает соответствующие режимы: Sleep и Power Down. Встроенный буфер FIFO позволяет уменьшить количество транзакций по управляющей шине и таким образом снизить нагрузку на хост-процессор. Датчик работает в диапазоне напряжений от 2.4 до 3.6 В.

Основные характеристики микросхемы L3GD20: регулируемый динамический диапазон: $\pm 250/\pm 500/\pm 2000$ °/с; интерфейс SPI/I2C; встроенный датчик температуры (8-бит); 2 выхода внешних прерываний (interrupt, ready); интегрированные фильтры ВЧ и НЧ; напряжение питания 2.4...3.6 В; 1.8 В совместимые порты ввода/вывода; режимы пониженного энергопотребления (power-down и sleep); температурный диапазон $-40...+85$ °С; доступен в корпусе LGA-16 (4×4×1 мм).

По результатам измерения, полученным с помощью трехкомпонентных датчиков, возможна реконструкция пространственного портрета исследуемой конструкции. Портрет представляет собой визуализацию НДС конструкции, сформированную на основе показаний датчиков, зафиксированных в её критических точках. Портрет позволяет оценить параметры упругих деформаций во всем диапазоне эксплуатационных режимов и внешних механических воздействий: любое изменение геометрии или прочностных свойств вызывает изменение мод колебаний конструкции и, как следствие, изменение портрета. Таким образом, возможно прогнозирование эксплуатационных и прочностных свойств объекта.

Для составления достоверного портрета исследуемой конструкции необходимо установить датчики на участках, наиболее подверженных разрушению. Месторасположение таких участков не всегда очевидно без предварительных расчетов.

Одним из способов определения мест установки датчиков является виртуальное моделирование поведения исследуемой конструкции под воздействием внешних нагрузок с помощью расчетного модуля Simulation в программной среде SolidWorks.

Основными инструментами для анализа прочности и собственных частот сложных по геометрии деталей и конструкций в настоящее время являются численные методы, которые являются сегодня неотъемлемой частью среды SolidWorks. Наиболее эффективным для этих целей является метод конечных элементов (МКЭ). В процессе виртуального моделирования собственные частоты и формы колебаний определялись на основании модального анализа. При модальном анализе использовался метод блочной итерации подпространств [8], [9] :

$$K\vec{N} - \lambda B\vec{N} = 0,$$

где K – матрица жёсткости конструкции; $\vec{N}$ – собственный вектор; λ – собственное значение; $B = M$ – матрица массы в случае динамического анализа; в остальных случаях $B = K_s$ (K_s – матрица напряжения-жесткости, создаваемая линеаризацией соответствующего нелинейного оператора при решении задачи устойчивости).

Метод блочной итерации подпространства состоит в синхронных итерациях вектора в подпространстве заданного измерения. Каждый вектор, для которого завершён процесс сходимости итераций, удаляется из рабочего подпространства и на его место добавляется новый начальный вектор. Ортогональность векторов обеспечивается на каждом шаге итераций. Применяется следующий критерий сходимости:

$$\left| \frac{\lambda_i^{k+1} - \lambda_i^k}{\lambda_i^k} \right| < \text{tol},$$

где i, k – число форм и число шагов итерации соответственно; tol – допуск, заданный в поле «Допуск».

Нужно учитывать, что результаты модального анализа и анализа устойчивости определяются с заданной точностью, описываемой следующей формулой [8], [9]:

$$\mu = \frac{\|\vec{N}_i - \lambda_i K^{-1} B \vec{N}_i\|}{\|\vec{N}_i\|}.$$

Если процесс сходимости медленный, рекомендуется применить процедуру сдвига:

$$K_{\sigma} \vec{N} - \lambda B \vec{N} = 0,$$

где $K_{\sigma} = K - \sigma M$ (σ – значение сдвига).

Периодическое построение портрета текущего состояния объекта и сравнение его с эталоном по характеристическим признакам позволяет автоматизировать оценки текущего технического состояния объекта, его соответствия требуемым нормам эксплуатации. В качестве примера ССПС рассматривался железнодорожный кран ЕДК-300/5, виртуальная модель которого представлена на рис. 2.

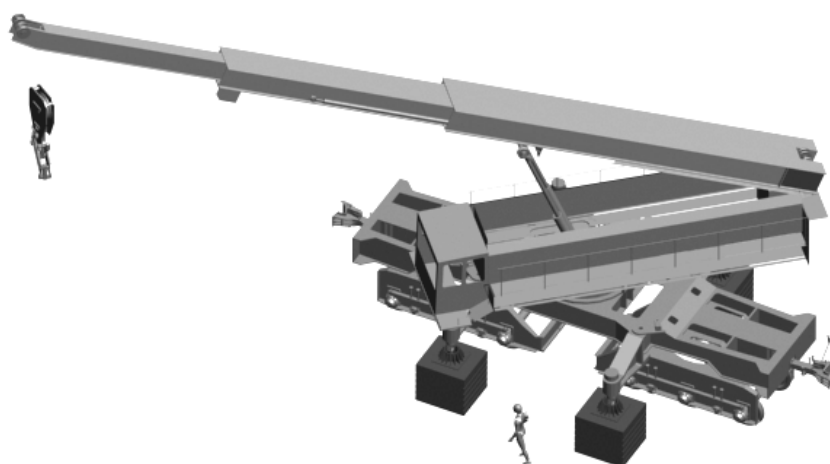


Рис. 2

Возможности системы SolidWorks позволяют выполнить графическое представление НДС поверхностей объекта с отображением шкалы нагрузок в цветовой гамме, построить эпюр напряжений и деформаций, что позволяет оперативно выявить наиболее подверженные разрушениям участки. При проведении расчетов вначале создается основной (контрольный) портрет, представляющий НДС объекта при нормальной работе. В процессе мониторинга происходит сравнение портрета, полученного на каком-либо отрезке времени, с основным. При появлении различных дефектов меняется характер сигнала датчика, что находит отражение в портрете объекта. Одновременный контроль акустических и магнитных свойств позволяет произвести их корреляционный анализ.

Результаты частотного анализа в программной среде SolidWorks нижней рамы железнодорожного крана ЕДК-300/5 (рис. 3) как в бездефектном состоянии (эксперимент 1), так и при наличии различных дефектов (эксперимент 2 –

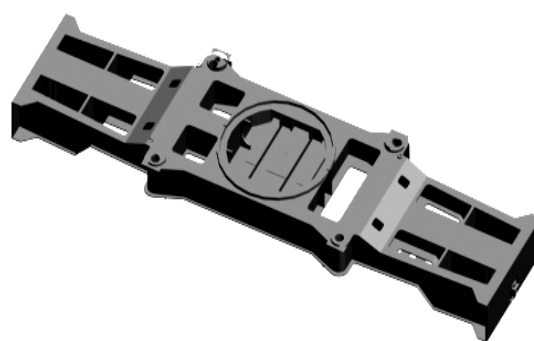


Рис. 3

трещина вертикального листа продольной балки длиной 210 мм в месте стыка с поперечной балкой, эксперимент 3 – трещина верхней горизонтальной полки продольной балки длиной 76 мм в месте крепления рамы опорно-поворотного устройства) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Номер режима	Частота, Гц		
	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3
1	55.45	50.22	48.34
2	100.62	80.33	88.67
3	120.03	112.56	110.12
4	151.47	141.33	149.45
5	168.57	140.3	131.1

Дефекты (трещины, отрывы листа) моделировались прямоугольными вырезами соответствующего размера и расположения. Анализ амплитуд максимальных перемещений участков дефектной и бездефектной нижних рам железнодорожного крана ЕДК-300/5 по компонентам вектора в различных частотных режимах показывает увеличение их значений в направлении общего снижения жёсткости конструкции при снижении частоты соответствующего режима. Снижение частот подтверждается результатами частотного анализа, приведёнными в табл. 1. К сожалению, относительно небольшие трещины (длиной менее 40 мм) не оказывают существенного влияния на смещение резонансных частот конструкции. Однако они весьма сильно изменяют значения виброскорости и виброускорения, полученные в результате анализа линейной динамики с применением расчетного модуля Simulation в программной среде SolidWorks. Был проведён анализ линейной динамики телескопической стрелы железнодорожного крана ЕДК-300/5 с наличием трещины в боковом листе секции стрелы в районе телескопического сочленения (длиной 210 мм) и с трещиной в узле примыкания боковой стенки секции к нижнему листу (360 мм).

Результаты анализа линейной динамики нижней рамы железнодорожного крана ЕДК-300/5 в нормальном и дефектном состояниях показывают возможность предварительного определения значений виброскорости и виброускорения конструкций ССПС в задачах мониторинга на основе исследования их трёхмерных моделей.

Результаты анализа линейной динамики нижней рамы железнодорожного крана ЕДК-300/5 в программной среде SolidWorks представлены в табл. 2.

Таблица 2

Состояние рамы крана	Максимальное значение	
	скорости, мм/с	ускорения, мм/с ²
Нормальная	0.344	67.92
Дефект в стенке	0.439	57.05
Дефект в верхней полке	2.671	218.7
Дефект в нижней полке	0.469	0.776

Методы виртуального моделирования позволяют создать оптимальную модель размещения датчиков системы мониторинга технического состояния ССПС. При этом главной задачей является разработка методики измерений параметров работы путевых машин в различных режимах, анализа полученных данных и прогнозирования развития выявленных тенденций.

Применение трехкомпонентных МЭМС-датчиков в системах мониторинга технического состояния ССПС позволяет: проводить оперативную диагностику технического состояния путевых машин в различных эксплуатационных режимах; достоверно оценивать напряженно-деформированное состояние конструкций (реконструкция портрета), выявлять дефекты материала исследуемых конструкций и прогнозировать возможные усталостные разрушения; прогнозировать тенденции развития сложных автоколебательных процессов; оптимизировать процесс принятия решений по повышению эксплуатационной надежности машин и снижению материальных и временных затрат на их обслуживание.

Комплексный векторный мониторинг акустических и магнитных свойств ССПС на основе МЭМС-датчиков является универсальным методом определения параметров напряженно-деформированного состояния любых конструкций и силовых агрегатов, подвергающихся воздействию нагрузок, на всех стадиях жизненного цикла: от проектирования объекта, опытного производства, наладки, испытаний, ремонта и продления ресурса до непрерывного мониторинга развивающихся дефектов в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубов А. А., Дубов Ал. А., Колокольников С. М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: учеб. пособие. М.: ЗАО «ТИССО», 2008.
2. Власов В. Т., Дубов А. А. Физическая теория процесса «деформация – разрушение». Ч. I: Физические критерии предельных состояний металла. М.: ЗАО «ТИССО», 2007.
3. Смирнов В. Я. Измерение параметров вибрации: состояние и перспективы // Мир измерений. 2002. № 9, 10. С. 6–13.
4. Кобяков И. Б. Трехкомпонентный виброакселерометр для систем вибрационной диагностики технических систем // Контроль. Диагностика. 2001. № 10. С. 17–18.
5. Материалы первой, второй, третьей и четвертой международных научно-технических конференций «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла»: докл. и тез. докл. М.: Энергодиагностика, 1999, 2001, 2003, 2007.
6. Знание векторных характеристик вибрации – ключ к безопасности технических устройств / И. Кобяков, А. Сперанский, А. Хориков, А. Шатохин, С. Калинин // Двигатель. 2005. № 2. С. 8–11.
7. Барсуков В. С. Микросистемная спецтехника: интеграция и миниатюризация в одном флаконе / Микросистемная техника. 2003. № 4.
8. Лепеш Г. В. Проектирование БМП. Решение инженерных задач на ЭВМ. СПб: СПбГУСЭ, ИИЦ «Сервис», 2006.
9. Алямовский А. А. «Компьютерное моделирование в современной практике. СПб.: БХВ, 2005.

M. S. Korovina

THREE-DIMENSIONAL MEMS DEVICES IN THE SYSTEMS OF TECHNICAL MONITORING OF AUTOMOTIVE ROLLING-STOCK

In the article, the issues concerning the usage of three-dimensional MEMS devices in technical diagnostics of automotive rolling-stock are being considered. The strained construction's condition has been virtually evaluated with SolidWorks Simulation to determine proper placement of MEMS devices for technical monitoring and diagnostics.

MEMS devices, SolidWorks Simulation, technical monitoring and diagnostics, frequency evaluation