

УДК 51-73

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИНКЛИНОМЕТРА ЕМКОСТНОГО ТИПА

Гущик Р.Ю.¹, Рыжковская Д.С.², Хатько В.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»

Минск, Республика Беларусь

Инклинометр (датчик угла наклона) – это первичный датчик, используемый для измерения величины угла наклона различных объектов. В основе работы датчика лежит явления воздействия гравитационного поля Земли на его чувствительный элемент. Измерение угла происходит относительно гравитационного поля Земли. При нахождении контролируемого объекта не в статическом состоянии датчик измеряет результат взаимного воздействия не только вектора земной гравитации, но и всех векторов ускорения и вибрации, действующих на данный объект.

Акселерометры и инклинометры на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС), а также экодатчики (миниатюрные датчики для измерения освещенности, температуры и влажности) благодаря своим особенностям находят все большее применение в беспроводных системах мониторинга объектов. Преимущества интеграции МЭМС-датчиков – малый размер, низкое энергопотребление, возможность динамических измерений по одной или нескольким осям, высокая температурная стабильность, а также изменяющаяся (т. е. можно задавать) в зависимости от приложения чувствительность.

Повышенные характеристики разрабатываемых устройств, оснащенных МЭМС-сенсорами, позволяют применять беспроводную сенсорную сеть (БСС) в жестких условиях эксплуатации. Эти устройства регистрируют и передают данные о статических и динамических измерениях в реальном времени, устанавливают оптимальный режим сбора данных, уровень энергопотребления. Благодаря применению более мощных антенн и, как следствие, увеличенной дальности действия, в БСС можно использовать меньшее число сенсоров. Сегодня БСС с интегрированными МЭМС-датчиками находят все большее применение для мониторинга сохранности зданий, промышленных сооружений, производственного оборудования, мостов, контроля микроклимата теплиц, мониторинга работы буровых установок и состояния стационарных нефтяных платформ, трубопроводов, используемых в нефтяной и газовой промышленности, а также в инженерных системах (например в системах "умный дом").

На рис. 1 представлены схематическое изображение емкостного МЭМС инклинометра (а) и

геометрическая модель его чувствительного элемента (б).

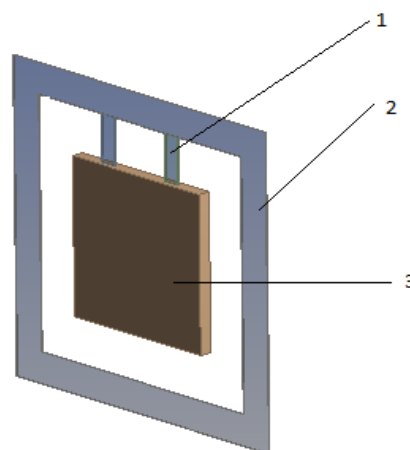
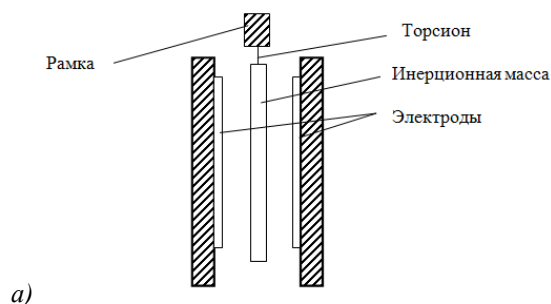


Рис. 1. Схематическое изображение емкостного МЭМС инклинометра (а) и геометрическая модель его чувствительного элемента (б): 1—кремниевый торсион, 2—кремниевая рамка, 3—инерционная масса из кремния

В ходе создания трёхмерной модели МЭМС инклинометра были приняты некоторые ограничения и допуски. Моделирование проводилось при определенных условиях: в местах крепления торсионов к рамке и к инерционной массе отсутствуют плавные переходы из одного объема в другой. Предполагалось также, что вся конструкция абсолютно жестко крепится за одну из поверхностей рамки. Таким образом, все точки, расположенные на данной поверхности при любом воздействии обладают нулевым перемещением.

При создании модели использовался внутренний модуль пакета Ansys, используемый для создания геометрических моделей. Чувствитель-

ный элемент МЭМС инклинометра состоит из рамки, двух торсионов, инерционной массы. При создании модели задавались следующие размеры чувствительного элемента инклинометра: рамка – 10 x 10 x 0,38 мм; торсион – 1,5 x 0,5 x 0,03 мм; инерционная масса – 4 x 4 x 0,38 мм.

В вертикальном положении емкость между электродом инерционной массой и электродом корпуса инклинометра составляет $C_0=4$ пФ при расстоянии между ними $d_0 = 17$ мкм. В данном положении сила тяжести действует вдоль инерционной массы и не приводит к изменению расстояния между электродами, а, следовательно, и емкости C_0 . При наклоне корпуса инклинометра сила тяжести разлагается на две составляющие, одна из которых действует вдоль инерционной массы ($P_{||}$), а другая – перпендикулярно к ней (P_{\perp}). Именно действие составляющей P_{\perp} приводит к изгибу торсионов, смещению инерционной массы к одной из стенок корпуса инклинометра и, как следствие, изменению расстояния между ними (Δd) и начальной емкости на ΔC .

На рис. 2 схематически представлено действие составляющей P_{\perp} силы тяжести на горизонтально расположенную инерционную массу инклинометра (а) и его представление в среде Ansys (б).

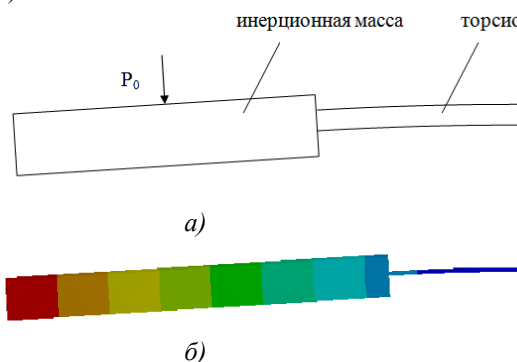


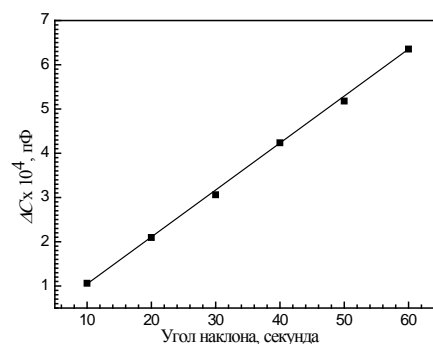
Рис. 2. Положение наклона инерционной массы под действием силы P_0 (P_{\perp}) схематическое (а) и в среде Ansys (б)

Величина P_{\perp} зависит от угла наклона инклинометра (α) и находится из выражения $P_{\perp}=V \times \rho \times g \times \sin \alpha$, где V и ρ - соответственно объем инерционной массы и плотность кремния, g – ускорение свободного падения.

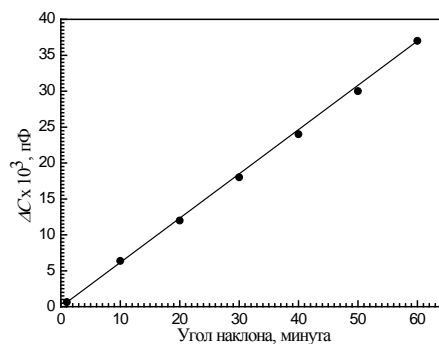
Значения изменения емкости инклинометра от смещения Δd (или угла наклона) инерционной массы, находятся по формуле

$$\Delta C = C_0 \times \frac{\Delta d}{(d_0 - \Delta d)}$$

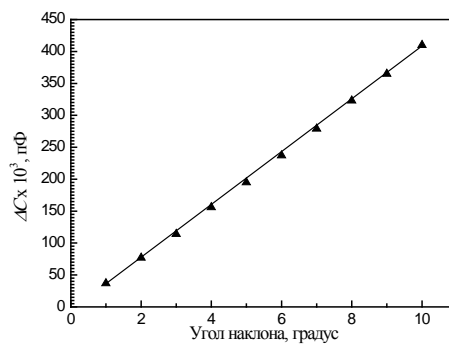
На рис. 3 представлены расчетные значения изменения емкости для трех диапазонов угла наклона инклинометра $10''$ - $1'$ (а), $1'$ - 1° (б) и 1° - 10° (в).



а)



б)



в)

Рис. 3. Изменения емкости инклинометра в зависимости от угла наклона: диапазон углов $10''$ - $1'$ (а), $1'$ - 1° (б) и 1° - 10° (в)

Таким образом, при начальном значении емкости инклинометра $C_0=4$ пФ ее изменение при углах отклонения $10''$, $1'$, 1° и 10° составляет $1,059 \times 10^{-4}$, $6,354 \times 10^{-4}$, $0,037$ и $0,41$ пФ.