

К. т. н. В. С. ГОЛУБ

Украина, г. Киев, Научно-производственная фирма VD MAIS
E-mail: info@vdmiais.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
20.03 2007 г.

ДАТЧИКИ УСКОРЕНИЙ И СИЛЫ ИНЕРЦИИ И ТЯГОТЕНИЯ

Рассмотрены силы инерции (самотяготения) и тяготения с позиции законов классической механики и общей теории относительности. Статья является развитием опубликованной ранее автором в «ТКЭА» № 1/2001.

На датчики ускорений в равной мере действуют как силы инерции, так и силы тяготения, обеспечивая, соответственно, измерение ускорений движения и тяготения (точнее, их составляющих, действующих в направлении осей чувствительности, обусловленных конструкцией датчиков). Примером могут быть датчики ускорений двух разновидностей — акселерометры и инклинометры, параметры которых приведены в **таблице**.

Указанные датчики [1] имеют, в принципе, одну и ту же конструкцию, но одни из них предназначены для измерения ускоре-

Публикуется в качестве дискуссионной.

ний движения, другие — углов наклона. Работа первых основывается на явлении инерции, вторых — на явлении тяготения, но, в соответствии с эквивалентностью явлений инерции и тяготения, это одни и те же датчики. В качестве примера отметим, что датчик ADIS16201 (из числа показанных в таблице) является и акселерометром, и инклинометром. В обоих случаях используется один и тот же чувствительный элемент датчика.

Чувствительным элементом датчика является сердечник, обладающий физической массой, которая в равной мере чувствует действующие на нее силы инерции и тяготения. Сказанное находится в полном соответствии с утверждением Эйнштейна о том, что инерция и тяготение — явления одной природы.

Сердечник устанавливается в датчике на упругой подвеске, обеспечивающей перемещение сердечника в направлении, принятом в качестве оси чувствительности. Реакция подвески уравнивает действующие силы инерции и тяготения, а величина смещения сердечника характеризует величину составляющих указанных сил. Сердечник датчика в

Параметры датчиков ускорений (акселерометров и инклинометров) серии ADIS16XXX фирмы Analog Devices

1 Параметры		Микросхемы серии ADIS16					
		003	006	201	203	204	350
Тип датчика	акселерометр	#	#	#	—	#	2 #
	инклинометр	—	—	#	#	—	—
Количество измерительных осей		2	2	2	3 1	2	3
Диапазоны измерений	ускорений, g	±1,7	±5	±1,7	—	4 ±70, ±37	5 ±10
	наклонов, °	—	—	±70	360 / ±180	—	—
Полоса частот измеряемых величин, Гц		—	0...2260	0...2250		0...400	0...350
6 Количество разрядов цифрового выходного сигнала		12			14		
Питание	Напряжение, В	3...5,25		3...3,6			4,75...5,25
	Ток потребления, мА	2	1,9	14	14	15	33
Температура окружающей среды, °C		-40...+125				-40...+105	-40...+85
Габаритные размеры датчика, мм		7,2×7,2×3,6		9,2×9,2×3,9			22,7×23,2×22,9
Дата данных		10/2005	3/2006	5/2006	8/2006	2007	1/2007

¹ Остальные параметры — в [1].

² В составе микросхемы — два датчика (трехосевые акселерометр и виброгироскопический), имеющие общий интерфейс. Виброгироскопический датчик — для измерения угловой скорости.

³ Измерение — по двум осям с формированием одноосевого выходного сигнала в диапазоне углов 0...360° (±180°).

⁴ По осям X, Y, в том числе измеряемых ударных перегрузок.

⁵ Уточняется.

⁶ На выходе интерфейса SPI (на вспомогательном выходе — 12).

равной мере чувствует как одну, так и другую силы, не различая их. Различие сил определяется установкой датчика и условиями производимых измерений.

Сила инерции (точнее, ее составляющая вдоль оси измерения), действующая на сердечник, определяется выражением

$$\mathbf{F}_и = -\mathbf{a}m, \quad (1)$$

где $\mathbf{a} = \mathbf{F}_{дв}/m$ — измеряемое ускорение движения, обусловленное действием внешне приложенной (движущей) силы $\mathbf{F}_{дв}$; $m = \text{const}$ — масса сердечника; знак минус обусловлен тем, что сила инерции направлена в сторону, обратную направлению измеряемого ускорения.

Выражение (1) может быть записано в виде

$$\mathbf{F}_и = \mathbf{a}_и m, \quad (2)$$

где $\mathbf{a}_и = -\mathbf{a}$ — ускорение инерции.

Что касается силы тяготения, то она действует на сердечник фактически в соответствии с тем же выражением (2), но в виде

$$\mathbf{F}_т = \mathbf{g}m,$$

где \mathbf{g} — ускорение тяготения, аналогичное ускорению инерции.

Несмотря на реальность приведенных выражений, на которых основывается работа датчиков, в некоторых курсах физики, например в [2, с. 81; 3, с. 229], утверждается, что силы инерции являются фиктивными — кажущимися, псевдосилами. В работах других авторов, соприкасающихся в своей деятельности с силами инерции, последние считаются реальными, но действующими в другой, неинерциальной (в отличие от инерциальной) системе отсчета [4, с. 68; 5, с. 153]. В инерциальной системе действуют внешне приложенные силы, а в неинерциальной — силы инерции. (Нужно сказать, что выбор тех или иных систем отсчета является всего лишь искусственным приемом, удобным как для описания физических явлений, так и для создания методик расчета. В теоретической механике используется, например, свой прием. Силы инерции называются даламберовыми, а динамические системы, в которых действуют внешне приложенные силы и указанные даламберовы силы инерции, условно считаются статическими.)

Сторонники фиктивности сил инерции исходят из следующего. Если считать силы инерции реальными и рассматривать их в качестве реакции на действие внешне приложенных сил, это значит согласиться с балансом сил (который действительно существует), равных по величине и обратных по знаку, т. е. согласиться с тем, что сумма сил равна нулю. А если так, то как быть со вторым законом Ньютона? Прежде чем ответить на этот вопрос, зададим встречный: а если не так, то как быть с третьим законом Ньютона?

Ответ на первый вопрос находим у автора книги [6, с. 35], который цитирует Ньютона. Формулируя свой второй закон, Ньютон применил термин «приложенная движущая сила», имея в виду именно ту силу, которая вызывает ускорение движения. Во втором законе Ньютон не учитывает силу инерции, но

не потому, что она фиктивная, а потому, что она возникает как результат ускорения.

Проследивается, согласно Ньютону, следующая последовательная цепочка действий:

**движущая сила →
ускоренное движение тела →
сила инерции.**

Сумма сил, движущей и инерции, действительно равна нулю, но ускорение вызывается движущей силой, а сила инерции, являющаяся следствием ускорения, должна учитываться не во втором, а в третьем законе Ньютона.

Проведем аналогию с явлениями в электротехнике, в частности, с явлением самоиндукции, которое, как показано в [7, 8], аналогично явлению инерции. Согласно второму закону (правилу) Кирхгофа, в замкнутой электрической цепи переменного тока сумма двух напряжений, ЭДС источника и ЭДС самоиндукции катушки индуктивности, равна нулю (активным сопротивлением, как и трением в механической системе, пренебрежем).

Механики задали бы вопрос: как же так, суммарное напряжение равно нулю, а ток течет? Не нарушается ли при этом закон Ома, аналогично нарушению второго закона Ньютона? Конечно же, закон Ома не нарушается, как и не нарушается закон Ньютона в механике. Не было бы тока, не было бы ЭДС самоиндукции. И никакие разные системы отсчета в электротехнике не используются. Электрики прекрасно знают, что в соответствии с законами Ома и Кирхгофа ток в цепи зависит не от суммы напряжений, равной нулю, а от ЭДС источников. То же можно сказать и о втором законе Ньютона. Приложенная внешняя (движущая) сила аналогична ЭДС источника, а сила инерции — ЭДС самоиндукции. Можно сказать, что второй закон Ньютона является аналогом закона Ома.

Далее. В электротехнике есть два близких явления — индукции и самоиндукции, которые обусловлены, в частности, наличием переменного магнитного поля. В первом случае поле создается внешней причиной и наводит в электрической цепи ЭДС, которая называется ЭДС индукции. Во втором случае магнитное поле создается собственным током цепи, обусловленным ЭДС источника, а наводимой ЭДС является указанная выше ЭДС самоиндукции.

В случае индукции магнитное поле эквивалентно полю тяготения, а в случае самоиндукции — полю инерции. Результатом являются сила тяготения в первом случае и сила инерции — во втором. Подобно ЭДС самоиндукции (в отличие от ЭДС индукции), поле инерции можно считать полем самотяготения, подчеркивая тем самым эквивалентность полей тяготения и инерции. Тело, двигаясь с ускорением, создает поле инерции (самотяготения), результатом которого является сила инерции (самотяготения).

Данное представление является аналогом рассмотренных явлений индукции и самоиндукции в электротехнике и соответствует общей теории относительности (в части эквивалентности явлений тяготения и инерции). Возникающее в результате

ускоренного движения поле инерции (самотяготения) ведет себя как поле тяготения.

Обратимся к общей теории относительности. Согласно общей теории, поле инерции, создаваемое движущимся телом, рассматривается как поле тяготения вселенной (можно сказать, среды), которая как бы движется с ускорением относительно указанного тела, условно находящегося в состоянии покоя [9, с. 89—90]. Рассмотренное выше представление поля инерции в качестве поля самотяготения соответствует общей теории относительности и является более простым и наглядным в вопросе понимания явлений инерции и тяготения.

Дополним приведенную выше последовательность действий наличием поля и реакции опоры, которая равна силе инерции (с противоположным знаком):

**движущая сила →
ускоренное движение тела →
поле инерции (самотяготения) →
сила инерции → реакция опоры.**

Дополнительно отметим, что поле инерции (самотяготения), подобно полю самоиндукции, является как бы посредником между ускоренным движением и возникающей силой инерции (самотяготения). Если пользоваться представлением происходящего в двух системах отсчета, инерциальной и неинерциальной, то поле инерции (самотяготения) является передаточным звеном между этими системами. Однако еще раз отметим, что представление происходящего в двух системах отсчета является субъективным. Есть одна реальная система существования рассмотренных явлений, как и в электротехнике.

В приведенной выше последовательности показана реакция опоры, которая в простейшем случае обусловлена жестким соединением тела с каким-либо объектом (опорой). Для датчика, в котором сердечник имеет упругую подвеску, можно записать более сложную последовательность:

**... сила инерции →
смещение сердечника (массы) →
сжатие/растяжение пружины →
реакция пружины → реакция опоры.**

Выводы

Вопреки утверждениям, что силы инерции являются якобы кажущимися, псевдосилами, и в подтверждение законов Ньютона и общей теории относительности Эйнштейна:

- показана аналогия между явлениями индукции и самоиндукции (в электротехнике), с одной стороны, и тяготения и инерции (в механике), с другой;
- показано, что поле инерции, обусловленное ускоренным движением тела, можно рассматривать как создаваемое телом поле самотяготения, которое подобно внешнему полю тяготения;
- силы инерции необходимо учитывать не во втором, а в третьем законе Ньютона;
- понятие инерциальной и неинерциальной систем отсчета в механике является условным, реально существует одна система (как и в электротехнике);
- законы Ньютона (классической механики) совместимы с общей теорией относительности Эйнштейна.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Analog Devices' Data Sheets: ADIS16003, Rev. 0, 10/05; ADIS16006, Rev. 0, 3/06; ADIS16201, Rev. A, 5/06; ADIS16203, Rev. 0, 8/06; ADIS16204, Rev. PrC, 2007; ADIS16350, Rev. PrB, 1/07 (www.analog.com).
2. Берклеевский курс физики. Т. 1: Киттель Ч., Найт В., Рудерман М. Механика.— М.: Наука, 1983.
3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 1–2.— М.: Мир, 1976.
4. Ишлинский А. Ю. Механика относительного движения и силы инерции.— М.: Наука, 1981.
5. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности.— М.: Высш. шк., 1986.
6. Спасский Б. И. Физика в ее развитии.— М.: Просвещение, 1979.
7. Голуб В. С. Датчики ускорений на базе микромеханики и микроэлектроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2001.— № 1.— С. 31—34.
8. Голуб В. Микромеханические датчики ускорений и угловых скоростей серии ADIS16xxx // Chip News Украина.— 2006.— № 7.— С. 96—101.
9. Гарднер М. Теория относительности для миллионов.— М.: Атомиздат, 1967.

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Формирование наноструктурированных пленок иридия и поликластерного алмаза. (Россия, г. Москва)
- Синхронизация и управление многофазным импульсным преобразователем с гранично-разрывным режимом функционирования. (Украина, г. Одесса)
- Метрологические характеристики яркометра «Тензор-28». (Украина, г. Черновцы)
- Спектры фоточувствительности поверхностно-барьерных структур Ni-n-GaAs. (Туркменистан, г. Ашхабад; Россия, г. Санкт-Петербург)



- Экспериментальное исследование тепловых характеристик коллекторных термосифонов керамических коммутационных плат. (Украина, г. Киев, г. Львов)
- Средства характеристики жидкокристаллических дисплеев. (Украина, г. Киев)
- Аномальный фотовольтаический эффект в структуре с барьером Шоттки-Мотта. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Зарядочувствительный усилитель. (Украина, г. Одесса)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции