

УДК 681.2.002.2; 681.2.002.5

КРИТИЧНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МИНИАТЮРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

¹Денисов Ю.В., ²Капленко М.В.

¹ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: teormech@mmf.ustu.ru;

²ФГУП «Уральский электромеханический завод», Екатеринбург, e-mail: k-14627@planet-a.ru

Проанализирована работа интегрального акселерометра, в котором движение инерционной массы происходит в неинерциальной системе отсчета. Построена математическая модель инерционного акселерометра, которая может быть использована при настройке и регулировке прибора, при его изготовлении. Расчет акселерометра условно разделен на две части – статическую и динамическую. Для каждого режима работы составлены расчётные схемы. Движение чувствительного элемента акселерометра разделено на сектора, в каждом из которых на него действуют моменты внешних сил, моменты регулирующих устройств, магнитного тормоза, сил трения. Построена диаграмма моментов, приложенных к чувствительному элементу. Составлены и решены уравнения относительного покоя и движения инерционной массы при относительном движении. Получена передаточная функция прибора, с ее помощью проведена оценка влияния критических конструктивных параметров на функциональную характеристику прибора. Установлены критические конструктивные параметры акселерометра.

Ключевые слова: интегральный акселерометр, относительное движение, относительный покой, неинерциальная система отсчета, параметры настройки, критические конструктивные параметры

CRITICAL DESIGN PARAMETERS OF MINIATURE INTEGRAL ACCELEROMETERS

¹Denisov Y.V., ²Kaplenko M.V.

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, e-mail: teormech@mmf.ustu.ru;

²Federal State Unitary Enterprise Ural Electromechanical Plant, Ekaterinburg, e-mail: k-14627@planet-a.ru

The authors analyzed the operation of an integral accelerometer with the motion of inertial mass occurring in a non-inertial frame of reference. They built a mathematical model of an inertial accelerometer that can be helpful at setting and adjusting the device, as well as at its manufacture. The accelerometer's calculation is conveniently divided into two parts, the static and the dynamic one. For each operating mode calculation schemes are designed. The motion of the accelerometer's sensitive element is divided into sectors; in all of them the sensor experiences moments of external forces, moments of regulating devices, of a magnetic brake, and of friction forces. The authors constructed a diagram of moments applied to the sensor element. They found and solved the equations of relative rest and motion of inertial mass at relative motion. They obtained the device's transfer function; with its help they assessed the impact of critical design parameters on the functional features of the instrument. The authors set the accelerometer's critical design parameters.

Keywords: an integral accelerometer, relative motion, relative rest, a non-inertial reference frame, instrument settings, critical design parameters

Разработке инерционных интегрирующих приборов посвящен ряд научных работ [2–6]. Статья [6] посвящена методу многокритериальной оптимизации конструкции магнитного тормоза инерционного прибора (или, как определено в [6], «магнитной системы индукционного демпфера дискового типа, сочетающего в себе возможность плавной регулировки коэффициента индукционного демпфирования»). Ряд патентов и авторских свидетельств [2–5] посвящен конструкции магнитного демпфера и магнитной системы привода с регулируемым тяговым усилием. Однако они нуждаются в дополнении и уточнении для конкретных конструкций приборов и определяющих их параметров. Приведенные материалы являются востребованными при разработке конструкции, но не вполне эффективны при ре-

шении задач производства приборов, когда ряд конструктивных параметров уже определен и первоочередной является задача технологической подготовки производства. Поэтому в данной статье предложена математическая модель инерционного акселерометра, которая может быть использована при настройке и регулировке прибора, при его изготовлении. Основными причинами, побудившими авторов к разработке модели, послужили трудности, возникшие при изготовлении и настройке акселерометров.

Конструкция интегрального акселерометра с чувствительным элементом, совершающим вращательное движение, показана на рис. 1, а принцип его работы состоит в следующем. В начальный момент времени чувствительный элемент (4) удерживается в исходном положении силами магнитного

взаимодействия первого (1) и третьего (3) устройств регулирования. При воздействии на него силы, обусловленной переносным ускорением \vec{a}_e , в направлении, показанном на рис. 1, и достижении им заданного уровня чувствительный элемент переходит из состояния покоя в состояние движения. Во время движения на чувствительный элемент

действуют силы магнитного тормоза (8), передающиеся через зубчатую передачу (7) и второго устройства регулировки (2). Чувствительный элемент находится на одной оси с подвижной контактной группой (4), поэтому происходит коммутация электрических цепей контактов (5) при повороте чувствительного элемента на заданный угол.

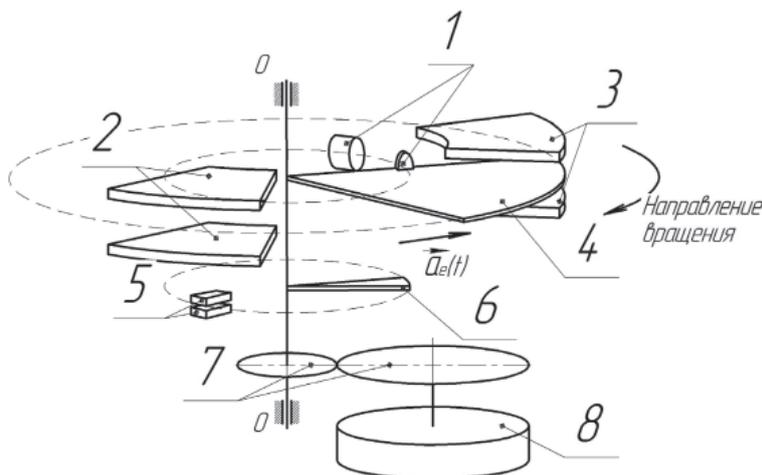


Рис. 1. Инерционный интегрирующий акселерометр с чувствительным элементом, совершающим вращательное движение:
1 – первое устройство регулирования; 2 – второе устройство регулирования;
3 – третье устройство регулирования; 4 – чувствительный элемент; 5 – контакты;
6 – подвижная контактная группа; 7 – зубчатая передача; 8 – магнитный тормоз;
O – ось вращения чувствительного элемента

Факторы, учтенные в математической модели

В представленной статье при определении функциональных характеристик акселерометра учтены следующие факторы:

а) закон изменения переносного ускорения;

б) значения нагрузок на чувствительный элемент прибора, определяемых его регулируемыми системами (с учетом различных вариантов регулировок и настроек магнитных систем);

в) допуски на геометрические размеры деталей шероховатость поверхностей;

г) отклонения магнитных свойств материалов, применяемых в регулировочных устройствах.

Все перечисленные факторы формируют спектр критичных параметров, оказывающий наиболее сильное влияние на функциональную характеристику прибора при настройке.

$$J_{\text{пр}} \cdot \ddot{\varphi}_1 + \kappa_{\text{т}} \cdot \left(\frac{r_2}{r_3} \right)^2 \cdot \dot{\varphi}_1 = m_1 \cdot r_1 \cdot d_0 \cdot \cos(\varphi_1 - 23^\circ) + m_1 \cdot r_1 \cdot d_1 \cdot \cos(\varphi_1 - 23^\circ) \cdot t - (1)$$

$$-M_{\text{регулр1}}(\varphi_1) - M_{\text{регулр2}}(\varphi_1),$$

Методика расчета

Установлено, что расчет интегрирующего акселерометра можно условно разделить на две части – статическую и динамическую. Для каждого режима работы составлены расчётные схемы. Движение чувствительного элемента акселерометра разделено на секторы, в каждом из которых на него действуют моменты внешних сил, моменты регулирующих устройств, сил трения. Расчет силовых характеристик регулирующих систем выполнялся с помощью пакетов Ansys, Pro/ENGINEER, с последующей аппроксимацией.

Приведем примеры дифференциальных уравнений, описывающих движение чувствительного элемента в первых двух секторах, и их нагрузочную диаграмму.

1. *Первый сектор.* Момент индукционного тормоза $M_{\text{маг.торм}}(\varphi_1) = \kappa_{\text{т}} \cdot \left(\frac{r_2}{r_3} \right)^2 \cdot \dot{\varphi}_1$

Уравнение имеет вид

где $J_{пр}$ – приведенный момент инерции; m_1 – масса чувствительного элемента; r_1 – расстояние от оси вращения до центра масс чувствительного элемента; d_0 – максимальная величина переносного ускорения, при котором чувствительный элемент находится в состоянии равновесия; d_1 – скорость

нарастания ускорения; $M_{регул1}(\varphi_1)$ – первого регулирующего устройства; $M_{регул2}(\varphi_1)$ – второго регулирующего устройства; r_2, r_3 – радиусы зубчатых колес.

2. *Второй сектор.* В данном секторе перестает действовать момент $M_{регул1}(\varphi_1)$. Уравнение имеет вид

$$J_{пр} \cdot \ddot{\varphi}_1 + \kappa_T \cdot \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 \cdot \dot{\varphi}_1 = m_1 \cdot r_1 \cdot d_0 \cdot \cos(\varphi_1 - 23^\circ) + m_1 \cdot r_1 \cdot d_1 \cdot \cos(\varphi_1 - 23^\circ) \cdot t - M_{регул2}(\varphi_1). \quad (2)$$

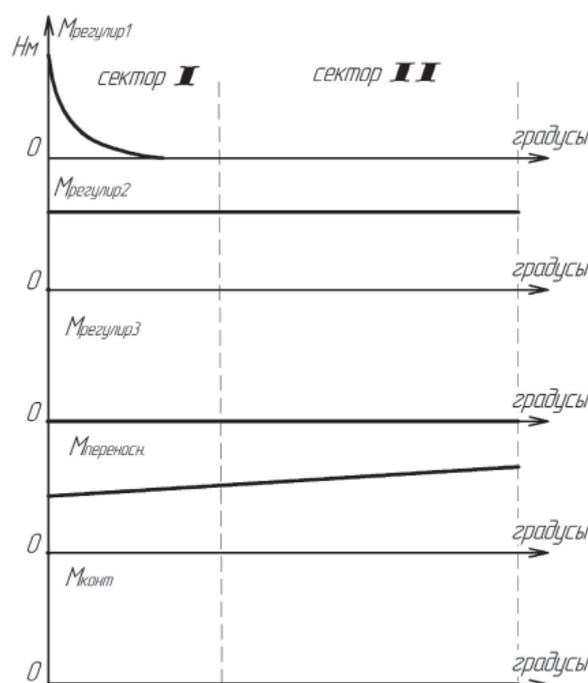


Рис. 2. Диаграмма моментов, приложенных к чувствительному элементу интегрирующего акселерометра, первые два сектора

Приведенные выше уравнения являются нелинейными, поэтому их решение осуществлено численным методом, интегрированным в программу Mathematica [7].

В результате решения уравнений во всех секторах получаем время срабатывания прибора $t_{сраб.}$, а соответственно и скорость его срабатывания (3):

$$I_1 = v_e = \int_0^{t_{сраб.}} a_e(t) dt. \quad (3)$$

Анализ

Системный анализ влияния внешних воздействий и конструктивных параметров на функциональные характеристики прибора, выполненный с использованием разработанной математической модели, учитывающей множество критичных конструктивных параметров.

1. Обеспечение постоянства скорости срабатывания при различных законах изменения переносного ускорения

$$v_e = \int_0^{t_{сраб.}} a_e(t) dt = const,$$

то есть $I_1 = I_2$ (рис. 3).

2. Влияние величины зазоров в регулирующих устройствах на величину напряженности поля в рабочих зазорах устройств, и в итоге на время срабатывания акселерометра в целом. Приведем для примера оценку влияния изменения зазоров в третьем регулирующем устройстве на погрешность срабатывания акселерометра табл. 1.

Принцип действия и конструкция третьего регулирующего устройства подробно представлены в [1].

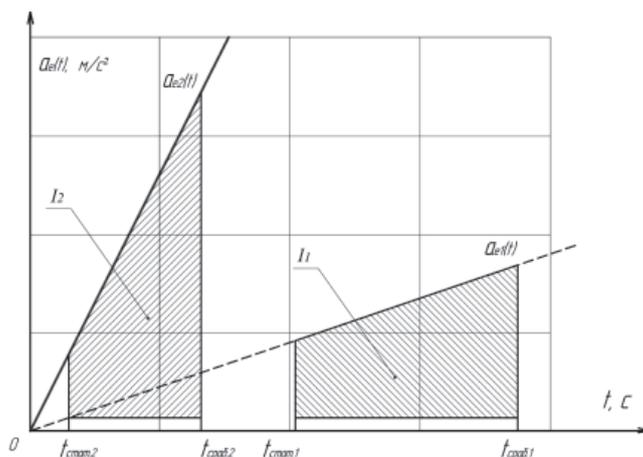


Рис. 3. Диаграмма срабатывания прибора для двух скоростей нарастания ускорения

Таблица 1

Оценка влияния изменения зазоров в третьем регулирующем устройстве на погрешность срабатывания акселерометра

Область изменения зазоров	Погрешность величины скорости срабатывания	
	При минимальном значении	При максимальном значении
Зазор B_3 от 0,2 мм min, B_3 0,3 мм min, при этом B_3 должен быть больше размера B_3 на 0,1 мм min	0%	3%

На рис. 4 показаны зазоры B_3 , B_3 , определяющие момент третьего регулирующего устройства.

3. Оценка влияния допусков на геометрические размеры на время срабатывания прибора. Рассмотрим это на следующем примере.

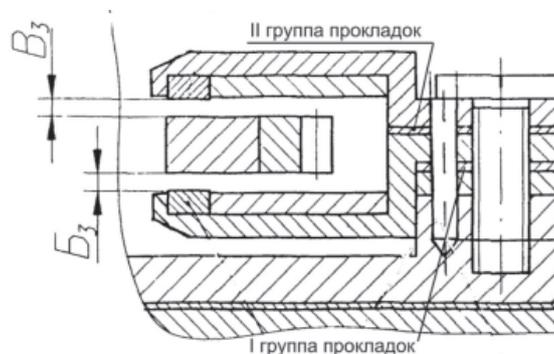


Рис. 4. Зазоры B_3 , B_3 третьего регулирующего устройства

Связь толщины диска h_1 ротора (рис. 5) (в пределах допуска) с параметрами модели и погрешностью срабатывания прибора с использованием разработанных аналитических зависимостей приведена в табл. 2.

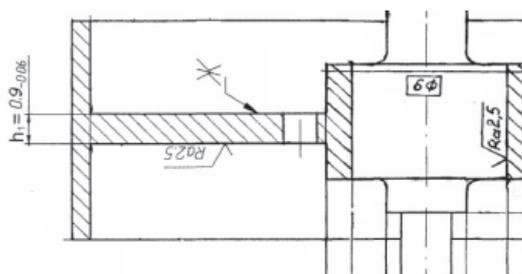


Рис. 5. Допуск на толщину диска

Таблица 2

Связь толщины диска ротора с параметрами модели и погрешностью срабатывания прибора

Деталь	Конструктивный параметр	Параметры детали	Параметры модели		Погрешность срабатывания	
		Масса	При наименьшем возможном значении параметра	При наибольшем возможном значении параметра	При наименьшем возможном значении параметра	При наибольшем возможном значении параметра
Ротор	Допуск – 0,06 мм на толщину диска 0,9...0,84 мм	4,8...4,6 гр	Момент инерции ротора 0,343 (кг·мм ²) Приведенный момент инерции $J_{np} = 110 \cdot 10^{-5}$ кг·м ² $K_T = 2,042 \cdot 10^{-5}$ Н·м·с·рад ⁻¹	Момент инерции ротора 0,351 (кг·мм ²) Приведенный момент инерции $J_{np} = 113 \cdot 10^{-5}$ кг·м ² $K_T = 2,19 \cdot 10^{-5}$ Н·м·с·рад ⁻¹	2 %	0 %

Согласно табл. 2, изменение толщины диска приводит к изменению погрешности срабатывания на величину в два процента.

Выводы

1. Полученная математическая модель интегрирующего акселерометра позволяет оценить влияние конструктивных параметров прибора на погрешность срабатывания.

2. Критичными конструктивными параметрами, существенно влияющими на настройку интегрирующего акселерометра, являются напряженность магнитного поля в рабочих зазорах первого и третьего регулирующего устройств, а также коэффициент торможения магнитного тормоза.

Заключение

В дальнейшем предполагается рассмотреть влияние технологического процесса на критичные конструктивные параметры. Предполагается проанализировать возможность оптимизации процессов сборки и настройки прибора с использованием разработанных математических моделей.

Список литературы

1. Великанов В.Б. Использование математического описания магнитных систем инерционных приборов для повышения точности и сокращения времени их технологической настройки / В.Б. Великанов, Ю.В. Денисов, М.В. Капленко // Новые промышленные технологии. – 2010. – № 5. – С. 40–47.
2. Магнитная система с температурной компенсацией / Колесников С.В., Нохрин В.П., Собянин В.Г., Сивогризов П.Ф. // Патент РФ № 88199. 2009.
3. Магнитоиндукционный демпфер / Колесников С.В., Нохрин В.П., Собянин В.Г., Сивогризов П.Ф. // Патент РФ № 2343491. 2009.
4. Магнитоиндукционный демпфер для измерительного устройства / Собянин В.Г., Верещагин А.В., Чумаков А.Е., Федосеев Н.Н., Ванин А.В. // Патент РФ № 92966. 2010.
5. Магнитная система привода с регулируемым тяговым усилием / Собянин В.Г., Колесников С.В., Санныков А.В. // Патент РФ № 2263361. 2005. Бюл. № 30.

6. Собянин В.Г. Новые магнитные системы электрических машин и индукционных демпферов, оптимизированные методами многокритериальной оптимизации с выделением главного критерия // Электротехника. – 1999. – № 10. – С. 27–31.

7. Эдвардс Ч. Г. Дифференциальные уравнения и краевые задачи: моделирование и вычисление с помощью Mathematica, Maple и MATLAB: пер. с англ. / Ч.Г. Эдвардс, Д.Э. Пенни. – 3-е изд. – М.: И.Д. Вильямс, 2008. – 1104 с.

References

1. Velikanov V.B., Denisov Yu.V., Kaplenko M.V. New Industrial Technologies [Novye promyshlennye tekhnologii] no. 5, 2010, pp. 40–47.
2. Kolesnikov S.V., Nokhrin V.P., Sobyenin V.G., Sivogrirov P.F. Magnetic system with temperature compensation, patent number 88199, 2009.
3. Kolesnikov S.V., Nokhrin V.P., Sobyenin V.G., Sivogrirov P.F. Magnetic induction damper, patent number 2343491. 2009.
4. Sobyenin V.G., Vereshagin A.V., Chumakov A.E., Fedoseev N.N., Vanin A.V. Magnetic induction damper for measuring device, patent number 92966, 2010.
5. Sobyenin V.G., Kolesnikov S.V., Sannikov A.V. The magnetic drive system with adjustable traction, patent number 2263361, 2005.
6. Sobyenin V.G. Jeletrotekhnika [Electrical engineering] 1999, no. 10, pp. 27. – 31.
7. Edwards C. Henry, Penny David E. Differential Equations and Boundary Value Problems: Computing and Modeling 3/e, 2008, 1104 p.

Рецензенты:

Чечулин Ю.Б., д.т.н., профессор кафедры детали машин Института фундаментального образования Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург;

Паршин В.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Металлургические и роторные машины» Механико-машиностроительного института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург.

Работа поступила в редакцию 14.10.2013.