

# ПЕРСПЕКТИВЫ ВВЕДЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В МАГНИТОЖИДКОСТНОМ АКСЕЛЕРОМЕТРЕ

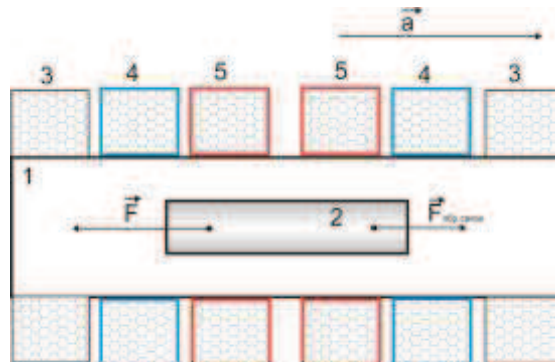
Д.В. ЕФРЕМОВ

Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, Букирева, 15

Акселерометр – прибор для измерения ускорения. В этой статье будет рассказано о принципе работы магнитожидкостного акселерометра, а так же об одном из путей уменьшения погрешностей измерения ускорения.

## Принцип работы одноосного магнитожидкостного акселерометра

На рис. 1 показана схема одноосного магнито-жидкостного акселерометра. Цифрой 1 отмечен цилиндр, заполненный магнитной жидкостью, внутри цилиндра 1, находится инерционное тело 2, изготовленное так же в форме цилиндра из немагнитного материала. Снаружи цилиндра 1 находится пара центрирующих катушек 3, которые создают напряжённость в магнитной жидкости, которая неоднородна и слабее всего в центре цилиндра 1, поэтому инерционное тело 2 выталкивается в центр цилиндра 1. Пара катушек 4 – сигнальные, через данные катушки пропускается переменный ток, магнитная жидкость выполняет функцию сердечника в катушках, в отсутствии ускорения индуктивность катушек равна.



**Рис. 1.** Схема одноосного магнито-жидкостного акселерометра с отрицательной обратной связью.

1 – цилиндр, заполненный магнитной жидкостью.

2 – инерционное тело.

3 – центрирующие катушки.

4 – измерительные катушки с переменным током.

5 – катушки обратной связи

Если система начинает двигаться с ускорением (на Рисунке 1 ускорение направлено вправо), то на инерционное тело 2 начинает действовать сила  $\vec{F}$ , которая отклоняет инерционное тело 2 влево, тем самым вытесняя магнитную жидкость из поля левой катушки 4. В результате чего индуктивность катушек становится различной, а по величине разности индуктивностей, можно судить о величине ускорения.

Но данный магнитожидкостный акселерометр обладает большой погрешностью, вызванной дрейфом нуля. Основная причина, вызывающая дрейф нуля – изменений свойств магнитной жидкости со временем. Избавиться от этого недостатка можно введя в конструкцию магнитожидкостного акселерометра отрицательную обратную связь. Отрицательная обратная связь стабилизирует работу акселерометра. Характеристики

прибора будут зависеть не от свойств магнитной жидкости, а от характеристик отрицательной обратной связи.

Для этого в конструкцию магнитожидкостного акселерометра добавляем пару катушек отрицательной обратной связи 5, инерционное тело изготовлено из токопроводящего материала. Если система движется с ускорением, на инерционное тело 2 будет действовать сила  $\vec{F}$ , которая отклоняет инерционное тело, индуктивность катушек становится различной. В зависимости от величины разности индуктивностей в катушках 4, через катушки отрицательной обратной связи 5 пропускается переменный ток. В результате действия переменного магнитного поля, в инерционном теле 2 будут рождаться вихревые токи, которые в свою очередь будут взаимодействовать с переменным магнитным полем. Вследствие чего на инерционное тело 2 будет действовать сила Ампера, на Рисунке 2 эта сила обозначена как  $\vec{F}_{обр.связи}$ , эта сила стремится вернуть инерционное тело в исходное положение. Судить о величине ускорения мы будем не по разности индуктивностей катушек 4, а по величине силы тока проходящего через катушки отрицательной обратной связи 5.

**Оценка возможностей отрицательной обратной связи.** Что бы оценить силу, действующую на металлический цилиндр в переменном магнитном поле, необходимо решить задачу. (Рис. 2). В поле витка с переменным током находится алюминиевое кольцо. Магнитная индукция, действующая на данное кольцо, будет иметь вид:

$$B = \frac{n\mu_0}{4\pi} \frac{R_1 I_0 e^{i\omega t}}{(R_1 - R_2)^2 + Z^2}, \quad (1)$$

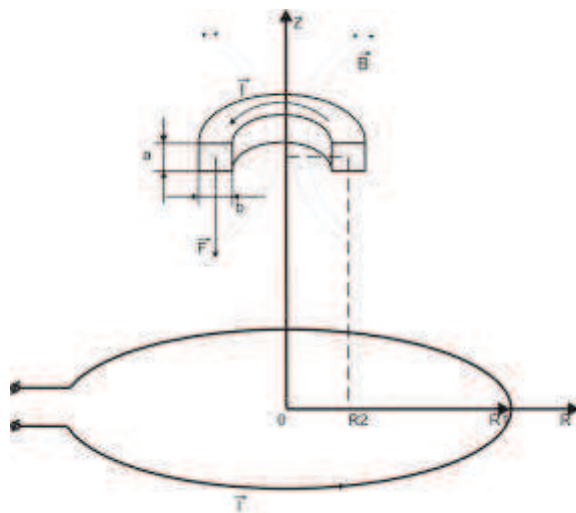
где  $n$  – число витков.

Поток магнитного поля  $\phi$  через замкнутую поверхность  $S$  имеет вид:

$$\Phi = \frac{n\pi\mu_0 R_1 R_2 b I_0 e^{i\omega t}}{(R_1 - R_2)^2 + Z^2}; \quad (2)$$

Выражение (2) продифференцируем по времени, тем самым найдём ЭДС электромагнитной индукции:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{n\pi\mu_0 R_1 R_2 b I_0 i\omega e^{i\omega t}}{(R_1 - R_2)^2 + Z^2}, \quad (3)$$



**Рис. 2.** Металлическое кольцо в переменном магнитном поле витка с током

Силу вихревых токов можно найти из закона Ома:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{сomp.}} + i\omega L} = - \frac{n\pi\mu_0 R_1 R_2 b^2 a I_0 i \omega e^{i\omega t}}{[2\pi\rho R_2 + i\omega Lab][(R_1 - R_2)^2 + Z^2]}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление,  $L$  индуктивность кольца; задача для индуктивности витка с током уже решена в [1], формула имеет вид:

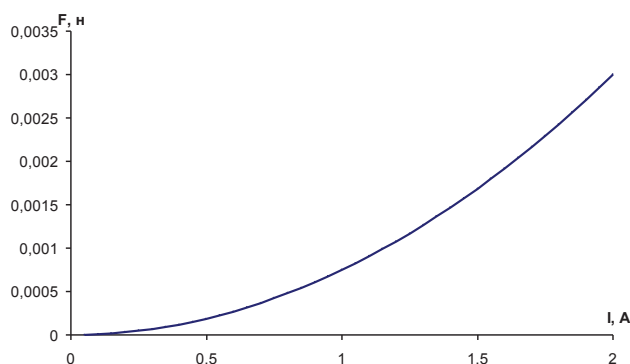
$$L = 4\pi R_2 \left( In \frac{8R_2 \sqrt{\pi}}{2b} - \frac{7}{4} \right).$$

Формулу (1) и (4) помножаем на комплексно сопряжённое, берём вещественную часть, усредняем по времени и в итоге всё подставляем в закон Ампера, и получим выражение для силы, действующей на инерционное тело:

$$F = IdlB \sin \alpha = - \frac{(n\mu_0 R_1 I_0)^2 R_2 a (L(\omega ab)^2 - 2\omega\rho R_2 ab)}{8[8(\pi\rho R_2)^2 + 2(ab\omega L)^2][(R_1 - R_2)^2 + Z^2]^2}.$$

### Оценка силы обратной связи, действующей на инерционное тело.

Итак, произведя все необходимые вычисления, была построена зависимость силы действующей на инерционное тело, от силы тока пропускаемого через катушку отрицательной обратной связи (Рис. 3). Сила, действующая на инерционное тело, была



**Рис. 3.** Сила, действующая на инерционное тело, в зависимости от силы тока пропускаемого через катушку отрицательной обратной связи

посчитана для алюминиевой трубки высотой 2 см диаметром 1 см и толщиной стенки 1 мм; находящаяся в поле катушки диаметром 2 см и содержащая 1750 витков.

Из графика видно, что на инерционное тело действует сила, которой даже не достаточно, что бы преодолеть силу выталкивания инерционного тела в область, где магнитная жидкость имеет слабую напряжённость. К сожалению, данная конструкция отрицательной обратной

связи не будет работать при наших параметрах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред // М.: Наука. 1982. 621 с.
2. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика // М.: Мир. 1989. 356 с.
3. Пшеничников А.Ф. Мост взаимной индуктивности для анализа магнитных жидкостей // Приборы и техника эксперимента. 2007. Т.24. С. 24–36.