

2. Маметьев, Л.Е. Направление повышения зарубежной способности исполнительных органов проходческих комбайнов с аксиальными коронками / Л.Е. Маметьев, А.А. Хорешок, А.Ю. Борисов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 5. – С. 21–24.
3. Хорешок, А.А. Основные этапы разработки и моделирования параметров дискового инструмента проходческих и очистных горных машин / А.А. Хорешок, Л.Е. Маметьев, А.М. Цехин, В.И. Нестеров, А.Ю. Борисов // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 7. – С. 9–16.
4. Маметьев, Л.Е. Разработка устройства пылеподавления для реверсивных коронок проходческих комбайнов / Л.Е. Маметьев, А.А. Хорешок, А.М. Цехин, А.Ю. Борисов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 3. – С. 17–21.
5. Маметьев, Л.Е. Улучшение процессов монтажа и демонтажа узлов крепления дискового инструмента на коронках проходческих комбайнов / Л.Е. Маметьев, А.Ю. Борисов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 4. – С. 23–26.
6. Проходческий комбайн : пат. на полезную модель 117503 РФ, МПК Е 21 D 9/00 (2006.01). / Антонов Ю. А., Горощенко Н. О., Буялич Г. Д., ; патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. профессион. образования «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева» (КузГТУ). – № 2012106078/03 ; заявл. 20.02.12; опубл. 27.06.12, Бюл. № 18. – 7 с.
7. Совершенствование гидросистемы проходческого комбайна / Ю. А. Антонов, В. А. Ковалев, В. И. Нестеров, Г. Д. Буялич // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 4. – С. 11–13.
8. Проходческий комбайн : пат. на полезную модель 119391 РФ : МПК Е 21 D 9/00 (2006.01). / Антонов Ю. А., Горощенко Н. О., Буялич Г. Д., ; патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. профессион. образования «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева» (КузГТУ). – № 2012113660/03 ; заявл. 06.04.2012 ; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. – 8 с.
9. Проходческий комбайн : пат. на изобретение 2494253 РФ : МПК Е 21 С 27/02 (2006.01), Е 21 С 35/24 (2006.01). / Антонов Ю. А., Горощенко Н. О., Буялич Г. Д. ; патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. профессион. образования «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева» (КузГТУ). – № 2012113667/03 ; заявл. 06.04.2012 ; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27. – 7 с.
10. Проходческий комбайн : пат. на полезную модель 120140 РФ : МПК Е 21 С 35/24 (2006.01). / Антонов Ю. А., Ковалев В. А., Горощенко Н. О., Буялич Г. Д., ; патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. профессион. образования «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева» (КузГТУ). – № 2012114017/03 ; заявл. 10.04.2012 ; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25. – 11 с.
11. Антонов, Ю. А. Предложения по совершенствованию гидросистемы проходческого комбайна / Ю. А. Антонов, Г. Д. Буялич, И. Ю. Корчагин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – Отд. вып. 6 : Промышленная безопасность и охрана труда. – С. 90–95.

### **ДИНАМИЧЕСКИЙ ГАСИТЕЛЬ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАСТРОЙКОЙ**

*А.К. Томили<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., проф., Е.В. Прокопенко<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

*г. Томск, 634050, г. Томск пр. Ленина, 30, тел. 8-913-874-08-77*

*E-mail: aktomilin@gmail.com*

*<sup>2</sup>Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева*

*Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69*

*E-mail: prokopenko.1982@mail.ru*

В статье [1] описан эксперимент, в котором наблюдается движение тороидальной катушки с током вдоль своей оси в поле магнитной пары. Рассмотрена задача о собственных колебаниях тороида на упругой подвеске с учетом продольной электромагнитной силы. Исследовано влияние индуктивности тороида на квазиупругие свойства системы, а, следовательно, и на ее собственные частоты. Исследована возможность резонансной настройки системы за счет изменения индуктивного параметра, включенного в цепь тороида.

В данной работе предлагается использовать этот эффект для гашения колебаний в системе с двумя степенями свободы. Цель исследования заключается в расчете индуктивности тороида, при которой обеспечивается полное гашение вынужденных колебаний основного тела.

Рассмотрим случай, когда система состоит из основного тела массой  $m_1$  и тороидальной катушки, соединенных упругими связями (пружинами) (рисунок 1). Жесткости пружин обозначены  $c_1, c_2, c_3$ . На основной груз действует периодическая вынуждающая внешняя сила с частотой  $p$ :

$$F = F_0 \sin(pt + \delta). \quad (1)$$

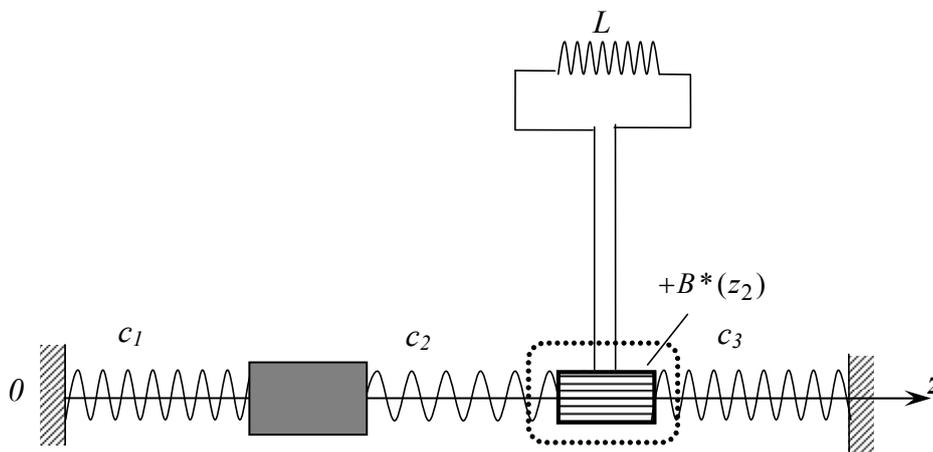


Рис. 1. Схема колебательной системы

Пусть цилиндрический тороид имеет размеры: внешний радиус  $R_T = 10 \text{ мм}$ , внутренний радиус  $r_T = 5 \text{ мм}$ , высота  $h = 10 \text{ мм}$ . Двухслойная бифилярная обмотка (с целью компенсации «набегающего» витка) состоит из 30 витков медного провода диаметром 1 мм. В качестве основы тороида используется пластиковый полый цилиндр. Тороид подвешивается над линией соединения двух плоских магнитов, каждый из которых имеет размеры:  $10 \times 20 \times 50 \text{ мм}$ . На торцах магнитной пары (вверху и внизу) образуются области, в которых создается магнитное поле, обладающее потенциальными свойствами [2]. Индукция этой компоненты магнитного поля описывается скалярной функцией  $B^*$ , поэтому используется термин «скалярное магнитное поле» (СМП). Как следует из эксперимента, в положительном СМП магнитная сила направлена по внутреннему току тороида, а в отрицательном – против этого тока. Представление об СМП позволяет теоретически рассчитать силу, действующую на тороид с током, помещенный во внешнее СМП [2].

Запишем дифференциальные уравнения вынужденных продольных колебаний системы при  $c_1 = c_2 = c_3 = c$  [3]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + c(2z_1 - z_2) = F_0 \sin(pt + \delta) \\ m_2 \ddot{z}_2 + c(2z_2 - z_1) = F^*(t) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $z_1, z_2$  - горизонтальные перемещения центров основного тела 1 и тороида 2 соответственно от состояния равновесия, в котором пружины не деформированы,  $F^*(t)$  - продольная магнитная сила.

Рассчитаем продольную магнитную силу, действующую на тороид. Используем закон безвихревой электромагнитной индукции [2]:

$$\varepsilon^* = \frac{d\Phi^*}{dt}.$$

Здесь  $\Phi^*$  - аналог потока магнитной индукции:

$$d\Phi^* = B^*(z_2) \cdot z_2(t) dz_2,$$

$z_2(t)$  - закон движения центра тороида.

В каждом витке обмотки тороида индуцируется напряжение. Витки соединены последовательно, поэтому:

$$U_L = wV(t) \int_{\xi_1}^{\xi_2} B^*(z_2) dz_2, \quad (3)$$

где  $w$  - число витков в обмотке тороида,  $V(t) = \dot{z}_2(t)$  - скорость тороида,  $\xi_1 = z_2 - \frac{h}{2}$ ,  $\xi_2 = z_2 + \frac{h}{2}$  - координаты торцов тороида,  $h$  - высота тороида.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть закон распределения СМП будет симметричен относительно точки равновесия тороида:

$$B^*(z_2) = B_0^* - \lambda z_2^2, \quad (4)$$

где  $B_0^*$  - максимальное значение СМП,  $\lambda$  - постоянная величина.

Пусть  $\lambda = 2 \cdot 10^4 \text{ Тл} / \text{м}^2$ , максимальное значение  $B_0^* = 1 \text{ Тл}$ ,  $z_{2\text{max}} = 0,005 \text{ м}$ .

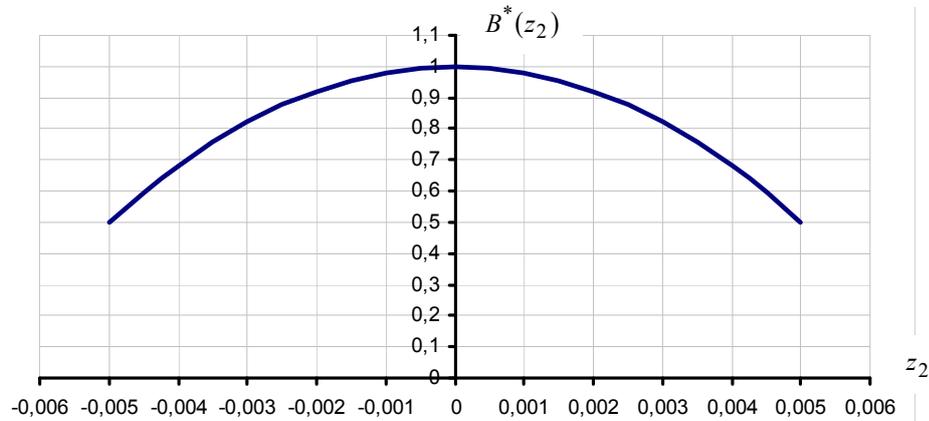


Рис. 2. График распределения СМП

Тогда закон (3) запишется в виде:

$$U_L = w\dot{z}_2 \int_{\xi_1}^{\xi_2} (B_0^* - \lambda z_2^2) dz_2 = w\dot{z}_2 \left[ B_0^* \cdot h - \lambda h \left( z_2^2 + \frac{h^2}{12} \right) \right].$$

Связь между напряжением и током  $J$  выражается законом электромагнитной индукции:

$$U_L = -L \frac{dJ}{dt}.$$

где  $L$  - индуктивность в цепи тороида.

Считаем, что собственная индуктивность тороида включена в  $L$ . Запишем выражение для силы тока:

$$J(t) = - \int_0^t \frac{U_L}{L} dt, \quad (5)$$

Преобразуем (5) с учетом (4):

$$J(t) = - \frac{1}{L} \int_0^t U_L dt = - \frac{w}{L} \left( \left( B_0^* \cdot h - \frac{1}{12} \lambda \cdot h^3 \right) z_2 - \frac{1}{3} \lambda \cdot h z_2^3 \right). \quad (6)$$

Если пренебречь активным сопротивлением, то ток смещен по фазе относительно напряжения на  $\pi/2$ . Поэтому при  $z = 0$  ток равен нулю:  $J_{z=0} = 0$ . Максимальное значение ток имеет при  $z = z_{\text{max}}$  (когда напряжение равно нулю).

Считаем, что условие, при котором можно пренебречь активным сопротивлением, при вынужденных колебаниях выполняется:

$$pL \gg R.$$

Запишем выражение продольной магнитной силы, действующей на тороид:

$$F^*(t) = wJ(t) \int_{\xi_1}^{\xi_2} B^*(z_2) dz_2. \quad (7)$$

С учетом (4) и (6) получаем:

$$F^*(z_2) = -\frac{w^2}{L} \left[ \left( B_0^* \cdot h - \frac{1}{12} \lambda \cdot h^3 \right) z_2 - \frac{1}{3} \lambda \cdot h z_2^3 \right] \left[ B_0^* \cdot h - \lambda h \left( z_2^2 + \frac{h^2}{12} \right) \right]. \quad (8)$$

Магнитная сила  $F^*(z_2)$  нелинейно зависит от координаты  $z_2$ . График зависимости представлен на рисунке 3.

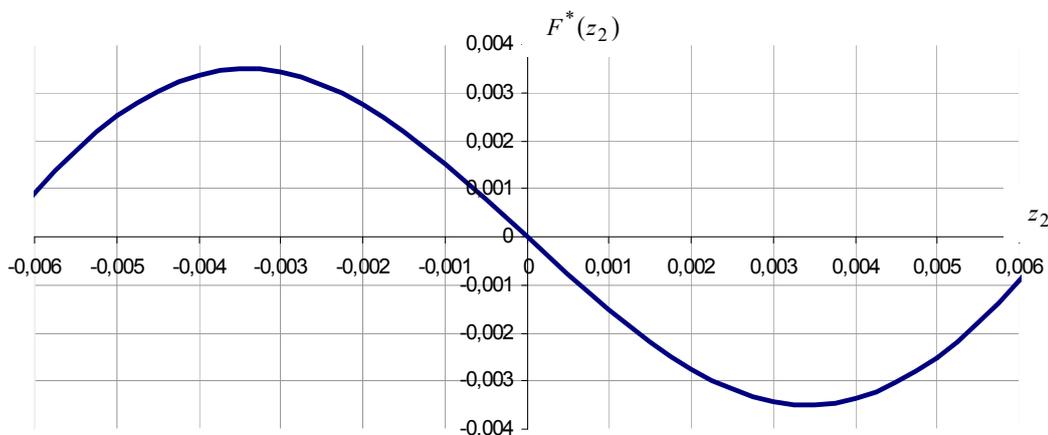


Рис. 3. График восстанавливающей магнитной силы  $F^*(z_2)$

Из графика (рис.3) видно, что в пределах  $z_2 = \pm 0,003$  характеристика практически линейная, то есть в этих пределах задачу можно линеаризовать.

$$F^*(z_2) \approx -\frac{w^2}{L} \left( B_0^* \cdot h - \frac{1}{12} \lambda \cdot h^3 \right)^2 z_2 = -c^* z_2, \quad (9)$$

где

$$c^* = \frac{w^2}{L} \left( B_0^* \cdot h - \frac{1}{12} \lambda \cdot h^3 \right)^2 \quad (10)$$

- дополнительная жесткость.

Запишем дифференциальные уравнения (2) в виде:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + c(2z_1 - z_2) = F_0 \sin(pt + \delta), \\ m_2 \ddot{z}_2 + c(2z_2 - z_1) + c^* z_2 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Из второго уравнения (11) видно, что магнитная сила в данной системе является квазиупругой. Следовательно, с ее помощью можно дистанционно, не останавливая процесс колебаний системы, влиять на режим движения. Решим вопрос о гашении колебаний основного тела.

Ищем частное решение этой системы уравнений в виде:

$$z_1 = A_1 \sin(pt + \delta), \quad z_2 = A_2 \sin(pt + \delta). \quad (12)$$

Из уравнений (11) с учетом (12) получаем значения амплитуд вынужденных колебаний:

$$A_1 = \frac{F_0(2c - m_2 p^2 + c^*)}{(2c - m_2 p^2 + c^*)(2c - m_1 p^2) - c^2},$$

$$A_2 = \frac{F_0 c}{(2c - m_2 p^2 + c^*)(2c - m_1 p^2) - c^2}.$$
(13)

Для гашения колебаний основного тела ( $A_1 = 0$ ) необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие:

$$2c - m_2 p^2 + c^* = 0,$$

то есть

$$c^* = m_2 p^2 - 2c.$$
(14)

Используя выражение (10) для дополнительной жесткости, получаем соотношение:

$$\frac{w^2}{L} \left( B_0^* \cdot h - \frac{1}{12} \lambda \cdot h^3 \right)^2 = m_2 p^2 - 2c,$$

из которого определяется значение индуктивности, при которой обеспечивается динамическое гашение колебаний основного тела:

$$L = \frac{w^2}{m_2 p^2 - 2c} \left( B_0^* \cdot h - \frac{1}{12} \lambda \cdot h^3 \right)^2.$$
(15)

Рассмотрим численный пример при следующих значениях:  $B_0^* = 1 \text{ Тл}$  - индукция СМП,  $\lambda = 2 \cdot 10^4 \frac{\text{Тл}}{\text{м}^2}$  - постоянная величина,  $h = 0,01 \text{ м}$  - высота тороида,  $m_2 = 0,007 \text{ кг}$  - масса тороида,  $p = 25 \text{ с}^{-1}$  - частота вынуждающей силы,  $c = 1,5 \frac{\text{кН}}{\text{с}^2}$  - жесткость пружин.

Для гашения колебаний основного тела необходимо включить в цепь тороида индуктивность величиной:

$$L = 0,045 \text{ Гн}.$$

В качестве вывода отметим, что при помощи регулировки индуктивности в цепи тороида можно изменять квазиупругие свойства системы и настраивать ее в режим гашения колебаний основного тела.

Литература.

1. Tomilin A.K., Prokopenko E.V. Effect of the inductive parameter of mechatronic system on elastic element longitudinal vibrations// Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) : proceedings of the International Conference, Tomsk, 16-18 October, 2014 / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU) ; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). — [S. l.]: IEEE, 2014. — [4 p.]. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6986861](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6986861)
2. Томилин А.К. Основы обобщенной электродинамики. – Интернет-журнал СПбГТУ "Математика в ВУЗе" № 17. [http://www.spbstu.ru/publications/m\\_v/N\\_017/frame\\_17.html](http://www.spbstu.ru/publications/m_v/N_017/frame_17.html)
3. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. - Учебное пособие для вузов. — 3-е изд., перераб. — М.: Наука, 1991. — 256 с.
4. Яблонский А.А., Норейко С.С. Курс теории колебаний. – Учебное пособие для студентов вузов. Изд. 3 исп. и доп.: М. «ВШ», 1975. – 248 с.