

УДК 621.313.282.2

## К ВОПРОСУ УЧЁТА ВЗАИМОВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ТРЁХКООРДИНАТНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА

И.Х. Хайруллин, Л.Н. Риянов, В.Е. Вавилов  
(ФГБОУ ВПО «УГАТУ»)

*Предложена оригинальная конструкция электромеханического преобразователя энергии колебательного движения с тремя степенями свободы индуктора, внедрение которого позволит повысить удельную мощность электрических машин данного класса и коэффициент полезного действия. Разработана математическая модель исследуемого трёхкоординатного электромеханического преобразователя колебательного движения, учитывающая взаимное влияние магнитных систем и отражающая взаимосвязь механических, электромагнитных и тепловых параметров предложенного технического решения. Приведён анализ полученных зависимостей. Результаты могут быть использованы на практике при проектировании одно-, двух- и трёхкоординатных электромеханических преобразователей энергии колебательного движения.*

**Ключевые слова:** нетрадиционные источники энергии, электромеханический преобразователь энергии колебательного типа, постоянные магниты.

Высокая стоимость энергоресурсов вынуждает обратить свой взгляд на так называемые нетрадиционные источники электрической энергии, в частности, на вибрационные электромеханические преобразователи энергии, среди которых особый интерес представляют источники электрической энергии, не содержащие промежуточного преобразования энергии колебательного движения во вращательное, что позволяет увеличить удельную мощность. Наиболее целесообразно использовать электромеханические преобразователи энергии (далее ЭМПЭ) с постоянными магнитами, так как при этом нет потерь энергии на возбуждение магнитного поля, что повышает КПД устройств данного типа. Так, например, автономные ЭМПЭ колебательного движения с постоянными магнитами могут служить источником питания светодиодных ламп в цехах машиностроительных предприятий, используя энергию вибраций здания, станков. Возможно применение подобных ЭМПЭ в ветроэнергетике [1].

Однако на сегодняшний день представлены лишь однокоординатные электромеханические преобразователи [2, 3]. Авторами предложена оригинальная конструкция [4], содержащая подвижную и неподвижную части (рис. 1). Подвижная часть предлагаемой конструкции выполнена в виде двухполюсных постоянных магнитов, закреплённых на упругих стержнях. Неподвижная часть состоит из катушек, размещённых по периметру корпуса. Это позволяет ЭМПЭ обеспечивать преобразование энергии возмущений внешней среды любого направления (например вибраций) в электрическую энергию.

При эксплуатации трёхкоординатного электромеханического преобразователя (ТКЭП) возникает вза-

имодействие его элементов, которое не присуще традиционным ЭМПЭ колебательного типа. Данное взаимодействие заключается в том, что при колебании одного из стержней магнитное поле активного элемента, установленного на нём, взаимодействует с магнитным полем активных элементов, установленных на соседних стержнях (рис. 2), что приводит к возникновению колебаний в них.

В связи с тем, что данный тип взаимодействия не присущ прочим колебательным ЭМПЭ, в работах отечественных и зарубежных авторов оно не рассматривается [2, 3]. Однако ввиду перспективности предлагаемой конструкции важно для практического внедрения рассмотреть данное взаимодействие, так как оно может как усиливать энергию, вырабатываемую ТКЭП, так и снижать её.

Для анализа данного взаимодействия необходимо разработать математическую модель, которая

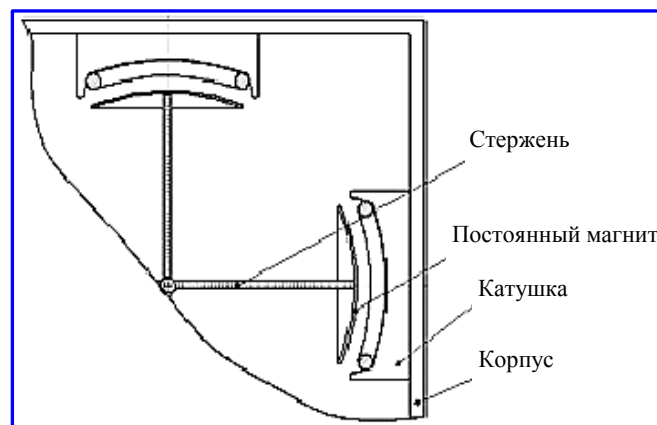


Рис. 1. Трёхкоординатный электромеханический преобразователь энергии колебательного движения

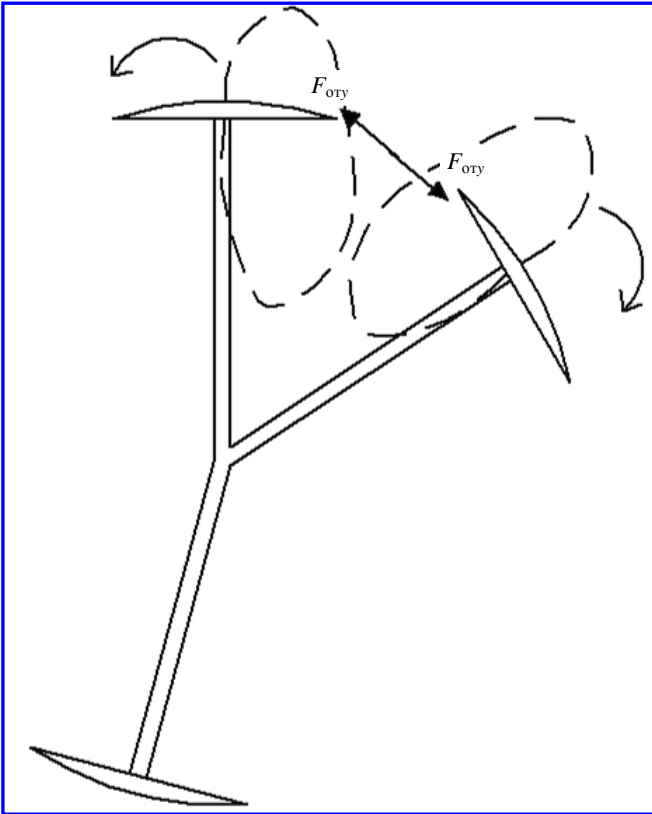


Рис. 2. Взаимодействие активных элементов ТКЭП

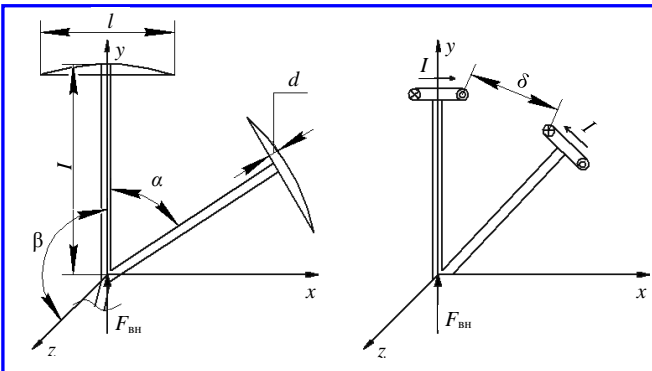


Рис. 3. Расчётная схема ТКЭП (слева) и физическая аналогия (справа)

позволит определить его влияние на энергию, вырабатываемую ТКЭП.

Математическая модель разрабатывается методом физических аналогий, реальные активные элементы ТКЭП – постоянные магниты заменяются на системы обмоток с током (рис. 3). При этом используются следующие допущения:

- магнитная проницаемость немагнитного зазора равна проницаемости вакуума  $\mu_0$ , магнитная проницаемость постоянных магнитов постоянна;
- силы отталкивания не допускают возможности удара магнитных систем;
- частота колебаний внешней силы равна частоте колебаний магнитной системы.

При разработке математической модели взаимодействия магнитных систем ТКЭП важно определить зависимость амплитуды колебаний от величины внешней силы. Энергия механического колебательного процесса стержня по оси  $x$  принимается в виде [5]:

$$W = \frac{1}{2} m \alpha_0^2 \omega^2 \frac{D}{2} \sin^2(\omega t) + \frac{1}{2} m \alpha_0^2 \omega_0^2 \frac{D}{2} \cos^2(\omega t),$$

где  $\omega_0$  – частота колебаний вынуждающей силы;  $\omega$  – собственная частота колебаний магнитной системы;  $m$  – масса магнитной системы;  $D$  – диаметр магнитной системы (на рис. 3 не показан);  $\alpha_0$  – угловая координата движения магнитной системы, изменяющаяся во времени;  $t$  – время колебательного процесса.

Дифференцирование энергии по величине перемещения приводит к выражению для внешней силы:

$$F = m \alpha_0 \omega^2 \frac{D}{2} \sin(\omega t) + m \alpha_0 \omega_0^2 \frac{D}{2} \cos(\omega t).$$

С учётом допущений:

$$F = m \alpha_0 \omega^2 \frac{D}{2} (\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t)).$$

Посредством тригонометрических преобразований при вынужденных колебаниях определяется угол  $\alpha$  (угол между двумя соседними стержнями):

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{l}{\sqrt{A^2 \sin^2(\omega t) + l^2}},$$

где  $A$  – амплитуда колебаний;  $l$  – длина активной системы (см. рис. 3). Тогда влияние внешней силы на амплитуду ТКЭП определяется выражением:

$$F = m \omega^2 \frac{D}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{l}{\sqrt{A^2 \sin^2(\omega t) + l^2}} \right). \quad (1)$$

Механические процессы ТКЭП с учётом взаимодействия магнитного поля активных элементов при внешней силе, направленной перпендикулярно оси  $y$ , и расположении активных элементов одноименными полюсами (см. рис. 3), определяются выражениями:

$$F \cos \beta + F_{\text{отт}} = m \omega_x^2 \frac{D}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{l}{\sqrt{A_x^2 \sin^2(\omega_x t) + l^2}} \right); \quad (2)$$

$$F \sin \beta + F_{отз} = m\omega_z^2 \frac{D}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{l}{\sqrt{A_z^2 \sin^2(\omega_z t) + l^2}} \right); \quad (3)$$

$$F_{оту} = m\omega_y^2 \frac{D}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{l}{\sqrt{A_y^2 \sin^2(\omega_y t) + l^2}} \right), \quad (4)$$

где  $\beta = 180 - \alpha$ : угол между двумя соседними стержнями противоположного направления.

Неизвестными элементами в описании механических процессов ТКЭП являются отталкивающие силы:  $F_{отх}$ ,  $F_{оту}$ ,  $F_{отз}$ . Для определения сил отталкивания активные элементы ТКЭП представляются в виде двухпроводной системы. Тогда для двухпроводной линии функция магнитного потока имеет вид:

$$V_M = -\frac{1}{2\pi} (I_1 \ln r_1 + I_2 \ln r_2) + C,$$

где  $I_1, I_2$  – токи первого и второго провода,  $A$ ;  $r_1, r_2$  – расстояние до точки измерения напряжённости, м;  $C$  – постоянная интегрирования.

Положим векторный потенциал  $A_z = 0$  в начале координат, тогда постоянная интегрирования  $C = 0$  [6], (4) принимается в виде:

$$V_M = \frac{I}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Векторный потенциал определяется в виде:

$$V_A = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{2\delta + d}{d}.$$

где  $d$  – толщина магнитной системы (см. рис. 3);  $\delta$  – расстояние между соседними стержнями (см. рис. 3).

Интегрируем магнитный поток по длине:

$$\Phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} l \ln \frac{2\delta + d}{d}.$$

Энергия магнитного поля в зазоре между проводами определяется с учётом выражений в виде [7]:

$$W_{ЭМ} = \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} l \ln \frac{2\delta + d}{d}.$$

Продифференцировав выражение магнитной энергии в зазоре по величине перемещения, определяется отталкивающая сила для системы проводов:

$$F_{от} = \frac{I^2 \mu_0 l}{\pi} \frac{1}{d + 2\delta}. \quad (5)$$

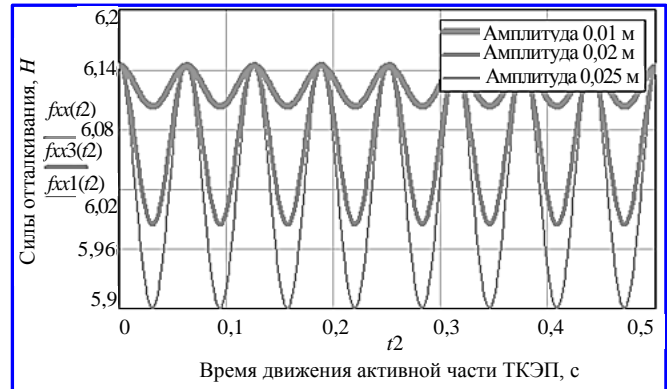


Рис. 4. Зависимость силы отталкивания от времени движения ТКЭП и амплитуды колебаний

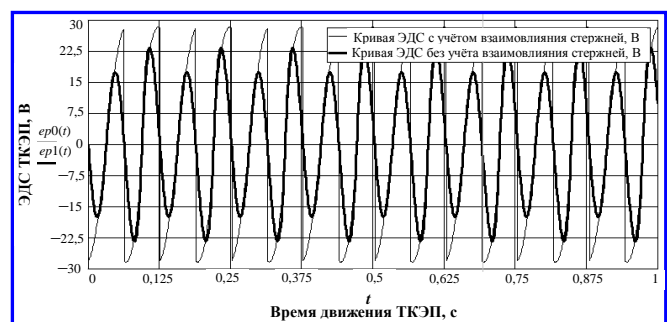


Рис. 5. ЭДС ТКЭП с учётом взаимодействия магнитных систем и без учёта их взаимодействия

Для магнитных систем ТКЭП силы отталкивания с учётом изменения воздушного зазора при колебаниях и при переходе от системы проводов к системе с постоянными магнитами [8] представляются в виде:

$$F_{оту} = \frac{4B_r^2 l^3}{\mu_0 \pi d}; \quad (6)$$

$$F_{отх} = \frac{4B_r^2 l^3}{\mu_0 \pi d + 2\sqrt{A_x^2 \sin^2(\omega_x t) + l^2}}; \quad (7)$$

$$F_{отз} = \frac{4B_r^2 l^3}{\mu_0 \pi d + 2\sqrt{A_z^2 \sin^2(\omega_z t) + l^2}}. \quad (8)$$

Выражения (5) – (7) являются справедливыми при первом взаимодействии между активными элементами ТКЭП. При последующих взаимодействиях зазоры зависят не только от колебаний, вызванных внешней силой, но и от колебаний, вызванных силами взаимодействия. При последующих взаимодействиях возникают:

$$F_{отх} = \frac{4B_r^2 l^3}{\mu_0 \pi d + 2\sqrt{A_x^2 \sin^2(\omega_x t) + l^2} + 2\sqrt{A_y^2 \sin^2(\omega_y t) + l^2}}; \quad (9)$$

$$F_{отц} = \frac{4B_r^2 l^3}{\mu_0 \pi d + 2\sqrt{A_z^2 \sin^2(\omega_z t) + l^2} + 2\sqrt{A_y^2 \sin^2(\omega_y t) + l^2}}; \quad (10)$$

$$F_{отлз} = \frac{4B_r^2 l^3}{\mu_0 \pi d + 2\sqrt{A_x^2 \sin^2(\omega_x t) + l^2} + 2\sqrt{A_z^2 \sin^2(\omega_z t) + l^2}}.$$

Выражения (5) – (10) совместно с выражениями (1) – (3) являются математическим описанием процессов взаимовлияния магнитных систем ТКЭП. Посредством разработанного математического аппарата возможны как исследования и анализ влияний данного взаимодействия на электромагнитные процессы в ТКЭП, так и проектные расчёты параметров ТКЭП.

На рис. 4 представлены численные расчёты зависимости силы отталкивания от времени движения при различных значениях амплитуды колебаний для одной координатной оси в программном комплексе Matchad 14.0.

Анализ зависимостей (см. рис. 4) показал, что с увеличением амплитуды колебаний верхнее значение силы достигает максимального значения, которое при увеличении амплитуды остаётся неизменным. Физически данное явление объясняется тем, что верхний предел ограничен механически соседним стержнем. Нижний предел силы при увеличении амплитуды на 50% снижается на 2%. В данном случае это объясняется тем, что происходит увеличение воздушного зазора.

Из разработанной математической модели могут быть выражены амплитуды колебаний каждой магнитной системы с учётом взаимодействий, после чего они подставляются в выражения ЭДС ТКЭП [9]:

$$e_x = \omega_x A_x DB_\delta w \sin(\omega_x t) \cos(\omega_x t);$$

$$e_y = \omega_y A_y DB_\delta w \sin(\omega_y t) \cos(\omega_y t);$$

$$e_z = \omega_z A_z DB_\delta w \sin(\omega_z t) \cos(\omega_z t).$$

На рис. 5 представлены численные расчёты ЭДС ТКЭП для одной координатной оси. При численных расчётах рассматривались два случая: с учётом взаимодействия и без него. Это было сделано для оценки влияния взаимодействия магнитных систем на ЭДС, а также для того, чтобы оценить важность учёта взаимодействия магнитных

систем при проектных расчётах ТКЭП.

Анализ зависимостей (см. рис. 5) показал, что при учёте взаимодействия магнитных систем ЭДС ТКЭП возрастает на 26%. Кроме того, при учёте данного взаимодействия изменяется характер кривой ЭДС.

В связи с этим учёт взаимодействия магнитных систем при проектных расчётах ТКЭП позволяет повысить их точность, что приведёт к минимизации экономических затрат, связанных с экспериментальными исследованиями и расхождениями проектных данных и характеристик реального ТКЭП.

Таким образом разработана математическая модель ТКЭП с учётом взаимовлияния магнитных систем. Полученная модель может быть использована на практике при проектировании ТКЭП.

### Литература

1. Томский инновационный форум [Электронный ресурс] // URL: <http://innovus.biz/ru/innonews/world/5278-v-ssha-razrabotan>. – (дата обращения 13.12.2012).
2. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. – СПб. : КОРОНА принт, 2008. – 368 с.
3. Boldea I, Nasar S. A. Linear motion electromagnetic systems / I. Boldea, S. A. Nasar. – New York, Wiley, 1985. – 482 p.
4. Пат. 2402142 РФ, Н 02 К 35/02. Генератор / Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Саттаров Р. Р., Риянов Л. Н.; БИ. – 2010; Бюл. № 21.
5. Биккин Х. М. Колебания: учеб. пособие / Х. М. Биккин. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2001. – 136 с.
6. Определение сил гибридного магнитного подшипника для высокоскоростных шпинделей / И. Х. Хайруллин, Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов // Вестник УГАТУ Т.16. – 2012.
7. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля / В. А. Говорков. – М. : Энергия, 1968. – 243 с.
8. Определение влияния статического эксцентриситета на устойчивость гибридного магнитного подшипника / И. Х. Хайруллин, Ф. Р. Исмагилов, В. Е. Вавилов // Вестник УГАТУ Т.16. – 2012.
9. Хайруллин И. Х., Риянов Л. Н., Вавилов В. Е. Трёхкоординатный колебательный электромеханический преобразователь энергии. Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5 [Электронный ресурс] // URL: <http://www.science-education.ru/105-7245>. – (дата обращения 23.10.2012).

Поступила в редакцию 18.12.2012

**Ирек Ханифович Хайруллин**, д-р техн. наук, профессор.  
**Линар Наилович Риянов**, аспирант, e-mail: [r.linar@mail.ru](mailto:r.linar@mail.ru).  
**Вячеслав Евгеньевич Вавилов**, аспирант, e-mail: [s2\\_88@mail.ru](mailto:s2_88@mail.ru).  
 Т. (347) 273-77-87.