

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ТРЕХКООРДИНАТНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Хайруллин И.Х., Риянов Л.Н., Вавилов В.Е.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, Россия, (45000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12)

В работе представлена актуальность исследования автономных источников энергии, предложена оригинальная конструкция электромеханического преобразователя энергии колебательного движения с тремя степенями свободы индуктора, внедрение которого позволит снизить массогабаритные параметры автономных источников электрической энергии, повысить удельную мощность электрических машин данного класса и коэффициент полезного действия. Разработана математическая модель установившегося режима работы исследуемого трехкоординатного электромеханического преобразователя колебательного движения, отражающая взаимосвязь между электрическими, магнитными и механическими параметрами оригинальной конструкции при установившемся режиме работы. Исследованы и проанализированы зависимости изменения электродвижущей силы катушки по времени от амплитуды и частоты колебаний. Результаты могут быть использованы на практике при проектировании одно-, двух- и трехкоординатных электромеханических преобразователей энергии колебательного движения.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь энергии колебательного типа; постоянные магниты; метод конечных элементов.

MATHEMATICAL MODEL OF THREE-AXIS STABILIZED OPERATING ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS OF THE VIBRATIONAL MOTION

Khairullin I.K., Riyanov L.N., Vavilov V.E.

Ufa State Aviation Technical University, Russia (45000, Ufa, street K. Marksa, 12), e-mail: r.linar@mail.ru

In this paper the actuality of the independent energy sources, the offer original design of electromechanical energy conversion oscillatory motion with three degrees of freedom of the inductor, the introduction of which will reduce the size and weight parameters independent power trains energy, increase the power density of electric machines of this class and efficiency. Were developed the mathematical model of steady state operation of the investigated tri electromechanical transducer vibrational motion, reflecting the relationship between the electrical, magnetic, and mechanical parameters of the original design at the steady work .. Investigated and analyzed the variation of the electromotive force of the coil at the time of the amplitude and frequency of vibration. The results can be used in practice in the design of one, two and three-axis electromechanical energy converters vibrational motion.

Keywords: electromechanical energy converter oscillatory type, permanent magnets, the finite element method.

В последние годы отмечается тенденция проявления особого интереса к автономным источникам энергии (далее АИЭ), подтверждением чего является появление значительного количества зарубежных и отечественных публикаций и патентов. Данный интерес объясняется тем, что с помощью малогабаритных и легких электромеханических преобразователей энергии (далее – ЭМПЭ), дополненных выпрямителями, накопительными конденсаторами и преобразователями напряжения, можно обеспечивать энергией портативные мобильные устройства при отсутствии централизованной сети питания промышленной частоты. Особое внимание заслуживают ЭМПЭ колебательного движения, которые позволяют использовать окружающую нас механическую энергию вибраций, толчков и т.п. Наиболее целесообразно использовать для этих целей ЭМПЭ с постоянными

магнитами [6], так как при этом нет потерь энергии на возбуждения магнитного поля, что существенно 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. Также можно освещать мосты, преобразовывая кинетическую и потенциальную энергии моста в электрическую. Либо подзаряжать КПК, мобильный телефон во время вашей ходьбы.

На рисунке 1 представлена оригинальная конструкция электромеханического преобразователя [1] и общая схема построения АИЭ на основе трехкоординатного колебательного электромеханического преобразователя (далее – ТКЭП), где ЭПР – элемент преобразования и распределения, Н – нагрузка, ЭН – накопительный элемент.

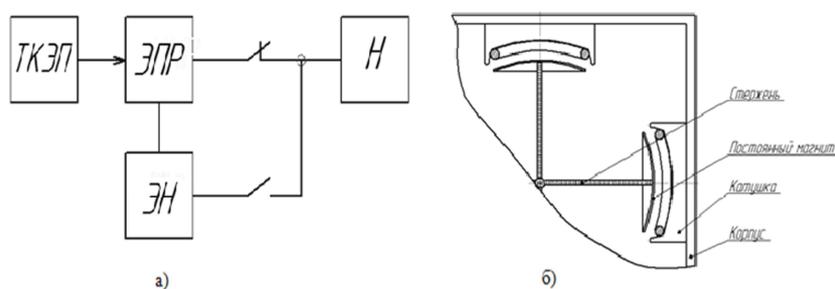


Рис. 1: а) структурная схема автономного источника энергии;
б) трехкоординатный электромеханический преобразователь колебательного движения.

Элемент преобразования и распределения включает в себя электронный блок, содержащий выпрямитель, накопитель и преобразователь уровней напряжения, и распределительный блок, обеспечивающий передачу электрической энергии потребителю.

Накопительный элемент позволяет аккумулировать электроэнергию при работе без нагрузки и выдавать её потребителю в период интенсивного потребления или при неработающем ЭМПЭ.

Анализ структурной схемы показывает, что основной частью АИЭ является сам ТКЭП. Следовательно, от выходных характеристик и параметров ТКЭП зависят требования, предъявляемые к АИЭ. А значит выбор конструктивной схемы ТКЭП является важным вопросом при разработке подобных систем.

Предлагаемый электромеханический преобразователь [1] содержит корпус, индукционную систему из подвижной и неподвижной частей. Подвижная часть выполнена в виде двухполюсных постоянных магнитов, закрепленных на упругих стержнях. Неподвижная часть состоит из катушек, размещенных по периметру корпуса. Это позволяет ЭМПЭ обеспечивать преобразование энергии возмущений внешней среды любого направления (например, вибраций) в электрическую энергию при уменьшении габаритов и

массы ЭМПЭ. Наиболее важным моментом при проектировании подобных электромеханических преобразователей является исследование ЭДС катушки и индукции в воздушном зазоре при установившемся режиме. В связи с этим задачей данной работы является разработка математической модели, описывающей электромагнитные процессы при установившемся режиме ТКЭП, и ее анализ.

Решение поставленной задачи сводилось к наиболее полному отражению реальной картины электромагнитного поля ТКЭП. Известные аналитические и графические методы исследования электромагнитного поля обладают значительной сложностью, что является причиной наложения множества допущений при расчетах, а следовательно, и снижением их точности. Наиболее точным методом решения задач подобного класса является численный анализ методами компьютерного моделирования. Численное решение определяется для конкретных габаритных размеров, что также ограничивает его применение. В связи с этим в работе использовался метод расчета электромагнитного поля, представляющий собой симбиоз математических методов и методов компьютерного моделирования.

На рисунке 2а представлена расчетная схема ТКЭП, на рисунке 2б – результаты компьютерного моделирования картины электромагнитного поля в программном комплексе *Ansys*.

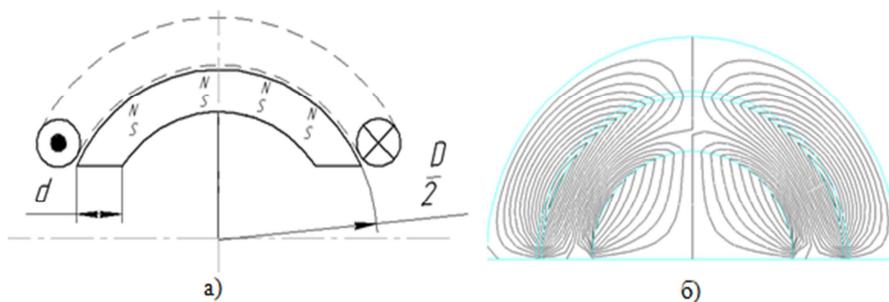


Рис. 2: а) расчетная схема колебательного контура;
б) картина электромагнитного поля ТКЭП.

Анализ полученной картины распределения магнитного поля (рис. 2б) показал, что в центре активного элемента магнитная индукция ТКЭП равняется нулю, а по мере удаления от центра она возрастает.

Ввиду сложности математического моделирования систем с постоянными магнитами активная система ТКЭП представляется в виде токового витка, тогда магнитная индукция на поверхности активной части ТКЭП принимается в виде [4]:

$$B_{m0} = \frac{2\mu_0 J d}{\pi D \left[1 - \left(\frac{x}{D} \right)^2 \right]} - \Pi \left(\frac{x}{D} \right), \quad (1)$$

где J – намагниченность постоянного магнита; D – диаметр постоянного магнита; d – толщина постоянного магнита; x – координата точки измерения магнитной индукции на поверхности постоянного магнита; $\Pi(k)$ – полный эллиптический интеграл 2 рода [2].

С целью качественного анализа (1) в среде MathCAD была построена зависимость магнитной индукции на поверхности ТКЭП от координаты (рис. 3).

Качественный анализ полученной зависимости (рис. 4), показал: в центре активного элемента магнитная индукция ТКЭП равняется нулю, по мере удаления от центра она возрастает. То есть данные математического расчета подтверждают данные компьютерного моделирования.

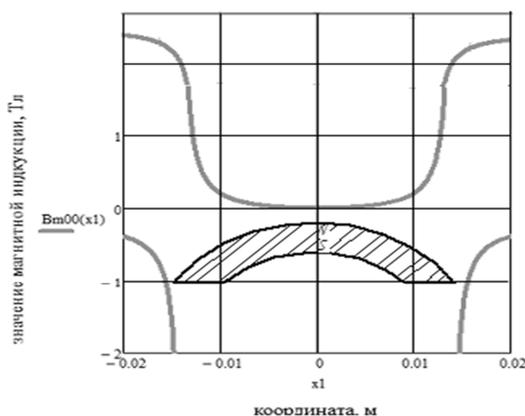


Рис. 3. Распределение магнитной индукции на поверхности ТКЭП.

При движении активной части ТКЭП происходит изменение активного диаметра магнитной системы, тогда:

$$B_{m0} = \frac{2\mu_0 J d}{\pi(D - A \sin(\omega t)) \left[1 - \left(\frac{x}{(D - A \sin(\omega t))} \right)^2 \right]} - \Pi\left(\frac{x}{D}\right), \quad (2)$$

где $A \sin(\omega t)$ – закон изменения координаты при колебаниях.

Магнитный поток холостого хода ТКЭП [3] определяется в виде:

$$\Phi_\delta = \frac{S_M B_{m0}}{\sigma}, \quad (3)$$

где S_M – эффективная площадь обмотки; Φ_δ – магнитный поток в воздушном зазоре; σ – коэффициент рассеяния.

Эффективная площадь обмотки принимается в виде:

$$S_M = \frac{D\varphi}{2\pi} l, \quad (4)$$

где D – диаметр кривизны обмотки, φ – центральный угол окружности, определяющий сектор обмотки; l – осевая длина обмотки.

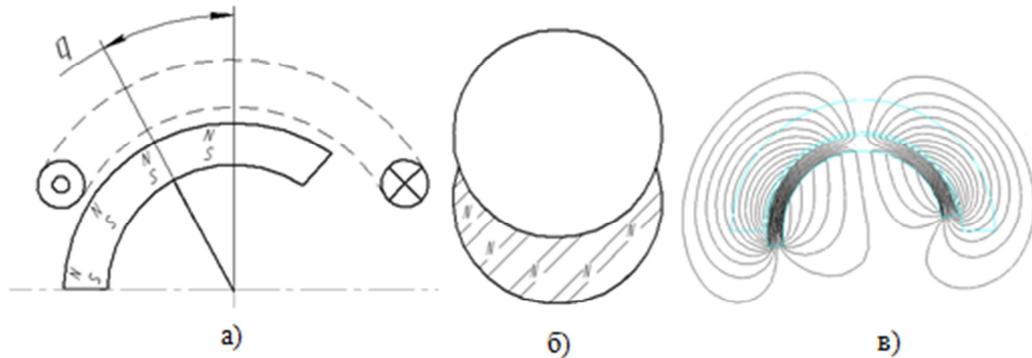


Рис. 4: а) расчетная схема колебательного контура при движении; б) ТКЭП вид сверху; в) картина электромагнитного поля ТКЭП при движении.

С учетом того что при движении активной части генератора происходит изменение эффективной площади обмотки и перераспределение магнитных потоков (рис. 5 а, б), то площадь обмотки, а следовательно и магнитный поток, принимаются в виде:

$$S_m = \frac{D(\varphi - \alpha)}{2\pi} l, \quad (5)$$

$$\Phi_\delta = \frac{D(\varphi - \alpha)lB_{0m}}{2\pi\sigma} - \frac{D\alpha lB_{0m}}{2\pi\sigma}, \quad (6)$$

где α – координата смещения активной части.

Слагаемое $\frac{D\alpha lB_0}{2\pi\sigma}$ представляет собой магнитный поток, который рассеивается при выходе постоянного магнита за пределы обмотки.

Координата колебаний постоянного магнита принимается в виде:

$$\alpha = A \sin(\omega t), \quad (7)$$

Тогда магнитный поток генератора при холостом ходе определяется как функция угловой координаты колебаний в виде:

$$\Phi_\delta = \frac{D(\varphi - A \sin(\omega t))lB_{0m}}{2\pi\sigma} - \frac{DA \sin(\omega t)lB_{0m}}{2\pi\sigma}, \quad (8)$$

Магнитная индукция в воздушном зазоре ТКЭП при холостом ходе определяется в виде:

$$B_\delta = \frac{DB_{0m}}{2\pi\sigma\delta l} (\varphi - 2A \sin(\omega t)), \quad (9)$$

Скорость движения активного элемента ТКЭП [5] определяется в виде:

$$v = \frac{d\alpha}{dt}, \quad (10)$$

Дифференцирование (10) с учетом (7) определяет скорость подвижного элемента:

$$v = \omega A \cos(\omega t). \quad (11)$$

Так как в установившемся режиме амплитуда колебаний определяется двумя составляющими, ЭДС в установившемся режиме определяется в следующем виде:

$$e_x = \omega A_x D B_\delta w \sin(\omega t) \cos(\omega t) \quad (12)$$

$$e_y = \omega A_y D B_\delta w \sin(\omega t) \cos(\omega t) \quad (13)$$

Таким образом, разработана математическая модель ЭДС ТКЭП в установившемся режиме.

С целью оценки адекватности разработанной математической модели в программном комплексе Mathcad были произведены численные расчеты. Результаты расчетов представлены на рисунке 5.

При увеличении амплитуды колебаний до 50% воздушного зазора ТКЭП зависимость ЭДС от времени движения имеет несинусоидальный характер и при этом значение ЭДС возрастает в 100 раз (рис. 5а). При амплитуде колебаний до 95% воздушного зазора заметно увеличивается несинусоидальность ЭДС, разность амплитуд между соседними пиками составляет 30% (рис. 5б), при этом ЭДС возрастает в 10 раз.

При частоте колебаний 90,7 Гц зависимость ЭДС от времени движения имеет несинусоидальный характер, разность между минимальным и максимальным пиками составляет 5-7% (рис. 5д). При увеличении частоты колебаний на 41% несинусоидальность ЭДС увеличивается, разность между максимальным и минимальным пиком составляет 15-20%, значение ЭДС увеличивается на 65,88% (рис. 5ж). При уменьшении частоты колебаний на 43% несинусоидальность ЭДС сохраняется с разностью между минимальным и максимальным пиками 2-3%, при этом ЭДС снижается на 50% (рис. 5е).

Адекватность полученных результатов подтверждает их схожесть с результатами других авторов [2], причем данные результаты получены иными методами для однокоординатного ЭМПЭ линейного возвратно-поступательного движения.

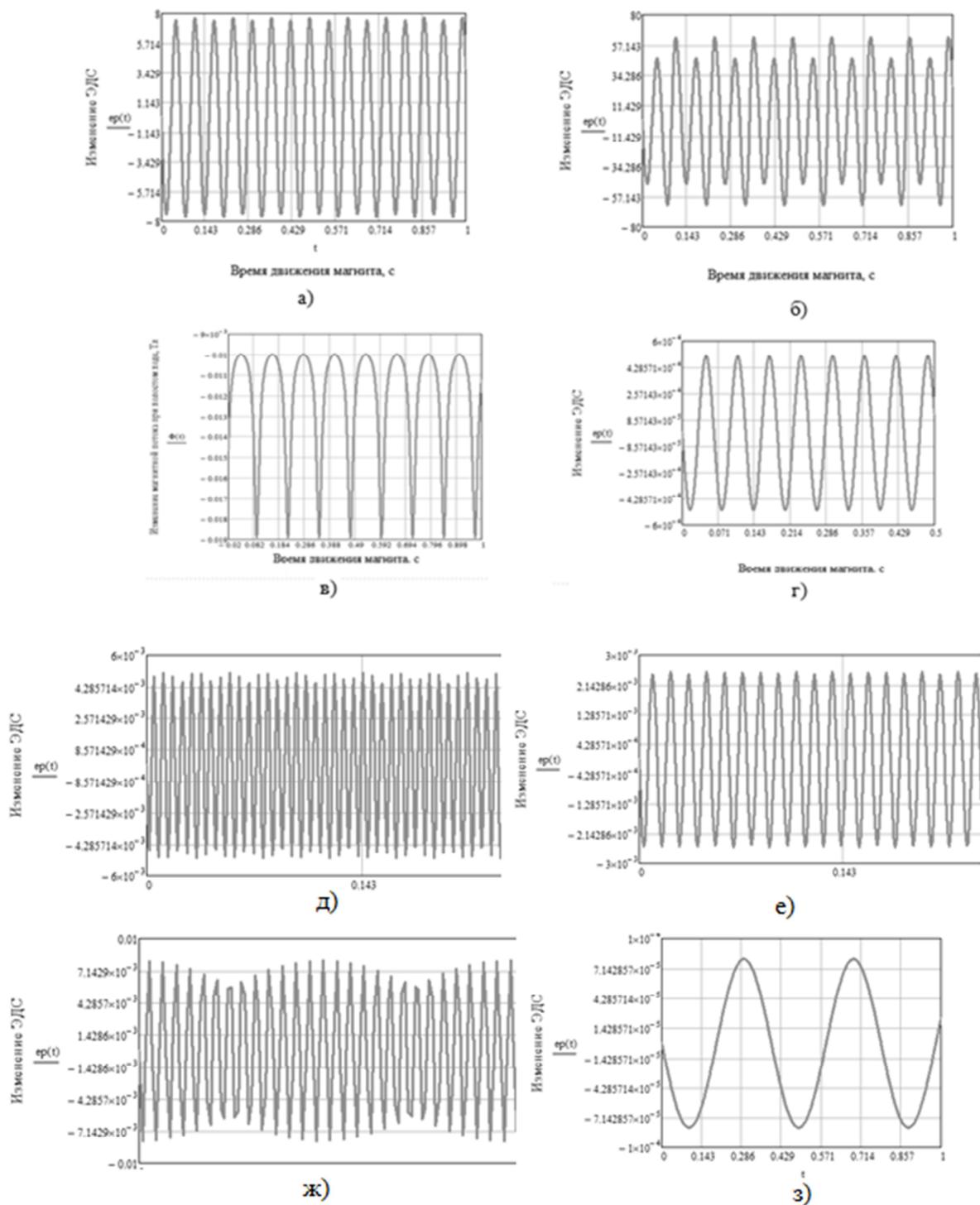


Рис. 5: а) зависимость ЭДС ТКЭП при амплитуде, равной 50% воздушного зазора; б) зависимость ЭДС ТКЭП при амплитуде, равной 95% воздушного зазора; в) зависимость магнитного потока ТКЭП при амплитуде, равной 95% воздушного зазора; г) зависимость ЭДС ТКЭП при амплитуде, стремящейся к нулю; д) зависимость ЭДС ТКЭП от частоты колебаний, частота 90,7 Гц; е) зависимость ЭДС ТКЭП от частоты колебаний, частота 39,8 Гц; ж) зависимость ЭДС ТКЭП от частоты колебаний, частота 127,4 Гц; з) зависимость ЭДС ТКЭП от частоты колебаний, частота 1,27 Гц.

Разработана математическая модель, описывающая электромагнитные и электромеханические процессы при установившемся режиме ТКЭП, и проведена

качественная проверка посредством компьютерного моделирования в программном комплексе *Ansys*.

Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании одно-, двух- и трехкоординатных электромеханических преобразователей энергии колебательного движения.

Список литературы

1. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Саттаров Р.Р., Риянов Л.Н. Генератор : Патент России № 2402142. Бюл. № 21 (II ч.), 09.11.2009.
2. Подольцев А.Д., Козырский В.В., Петренко А.В. Анализ динамических процессов в однофазном магнитоэлектрическом линейном генераторе возвратно-поступательного движения // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 5. – С. 22-30.
3. Постоянные магниты : справочник / А.Б. Альтман, Э.Е. Верниковский, А.Н. Герберг и др.; под ред. Ю.М. Пятина. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Энергия, 1980. – 486 с.
4. Сили С. Электромеханическое преобразование энергии. – М. : Энергия, 1968. – 376 с.
5. Скучек Е. Простые и сложные колебательные системы. – М. : МИР, 1971. – 590 с.
6. Хитерер М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб. : КОРОНА принт, 2008. – 368 с.

Рецензенты

Ураксеев М.А., д.т.н., профессор кафедры ИИТ ФГБОУ ВПО «УГАТУ», г. Уфа.

Гизатуллин Ф.А., д.т.н., профессор кафедры ЭМ ФГБОУ ВПО «УГАТУ», г. Уфа.