

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВИБРАЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА  
ИСТОЧНИКА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Каунг Мьят Хту<sup>1</sup>, В.А. Кудинов<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>аспирант кафедры программного обеспечения  
и администрирования информационных систем,  
e-mail: [kaungmhtoo16267@gmail.com](mailto:kaungmhtoo16267@gmail.com)*

*Курский государственный университет*

*<sup>2</sup>докт. пед. наук, профессор, проректор по учебной работе*

*Курская сельскохозяйственная академия*

В статье представлены результаты исследования влияния конструктивных параметров модели вибрационного генератора на величину магнитного поля для оценки возможностей снижения расхода активных материалов всей электромеханической системы преобразования энергии. Расчеты проводились в активной зоне генератора с помощью программного комплекса ANSYS. Исследовалась осесимметричная 2-D модель генератора с использованием «потокпараллельного» граничного условия, позволившего обеспечивать невыход за внешние границы модели эквипотенциальных линий магнитной индукции вблизи магнитной системы.

**Ключевые слова:** вибрационный генератор, магнитное поле, метод конечных элементов, граничные условия, воздушный зазор, постоянный магнит.

В последнее время наметился значительный рост числа разнообразных маломощных потребителей различного рода, работающих в автономных условиях без связи со стационарными энергосистемами. Автономность подобных систем в значительной степени обеспечивается путем применения электромеханических преобразователей (генераторов) энергии механического движения. Среди них выделяются вибрационные генераторы (ВГ), преобразующие энергию механического движения (тряски, колебания, вибрации) какой-либо среды или физического тела в электрическую.

Создание такого рода устройств сегодня осуществляется на основе специально разработанных моделей, описывающих физические процессы электромеханических систем (ЭМС) с минимальными допущениями и рассчитывающих дифференциальные параметры поля и интегральные энергетические характеристики. Одним из вариантов совершенствования методик расчета ЭМС, входящих в состав различных электрических устройств, является применение метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования электромагнитного поля. Для исследования влияния конструктивных параметров ВГ на величину магнитного поля, а также для осуществления оценки возможностей снижения расхода активных материалов целесообразно проводить расчет магнитного поля в активной зоне генератора с помощью программного комплекса ANSYS, использующего современные конечно-элементные технологии для выполнения электромагнитных расчетов [1].

Основными исходными данными для электромагнитного расчета ВГ являются его конструктивные параметры. Кроме того, в расчетах используются соответствующие

кривые размагничивания постоянных магнитов и намагничивания ферромагнитных материалов. Для расчета совокупности всех геометрических параметров ВГ в работе используется методика на основе классической теории электрических машин.

Поскольку конструкция ВГ, как и любой машины, изготовленной из реальных материалов, имеет ряд особенностей, таких как несовершенство формы, неоднородность свойств материалов, наличие остаточных напряжений в элементах конструкций, дефекты изготовления и прочие, то построение модели генератора включает в себя определение системы основных допущений, устанавливающей идеализацию свойств физических и геометрических характеристик конструкции и нагрузок, на основе которых строится модель.

В основе электромагнитного расчета генератора численным методом лежит модель, включающая в себя геометрические параметры ВГ, магнитные и электрические свойства его активных материалов. В ходе расчета определяются индукции и токи в различных сечениях модели генератора.

Точность результатов расчета и его трудоёмкость зависят от того, насколько удачно выбрана модель. Анализ моделей синхронных линейных генераторов с постоянными магнитами базируется на основе уравнений электромагнитного поля и построен на следующих допущениях [2; 3].

1. Поскольку токи запаздывания и смещения в распространении электромагнитной волны в пределах области электромагнитного поля пренебрежимо малы, то поле является квазистационарным.

2. Токи проводимости и токи смещения в диэлектрике, заполняющем зазор между статором и индуктором, не учитываются.

3. Токи проводимости в диэлектриках по сравнению с токами проводимости в проводниках достаточно малы и ими также можно пренебречь.

4. Скорость перемещения диэлектрика в зазоре не оказывает влияния на электромагнитное поле.

5. При рассмотрении поля в неферромагнитной среде относительная магнитная проницаемость этой среды принимается равной единице.

Конструкция ВГ характеризуется осевой симметрией, что позволяет рассматривать полевую задачу как двумерную в цилиндрической системе координат.

Проведем оценку влияния размеров постоянных магнитов на величину индукции в воздушном зазоре статора при помощи конечно-элементной модели ВГ с использованием программы ANSYS (см. рис.1).

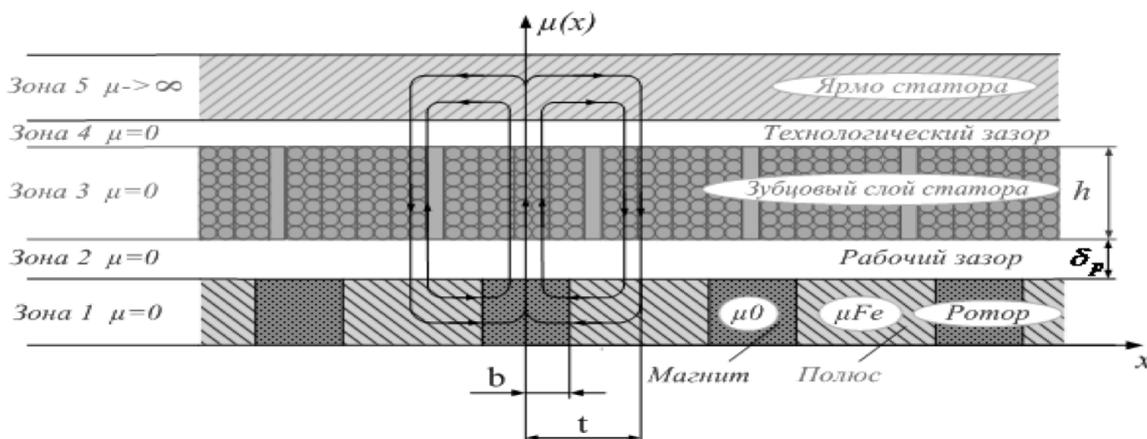


Рис. 1. Расчетная модель ВГ

Для математического описания электромагнитного поля генератора воспользуемся системой дифференциальных уравнений Максвелла [5]:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{J} \\ \operatorname{div} \vec{D} &= \rho \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля (В/м);

$\vec{B}$  – магнитная индукция (Тл);

$\vec{H}$  – напряженность магнитного поля (А/м);

$\vec{D}$  – электрическое смещение (Кл/м<sup>2</sup>);

$\vec{J}$  – полная плотность тока;

$\rho$  – объёмная плотность электрического заряда (Кл/м<sup>3</sup>).

Данная система уравнений может быть дополнена уравнениями связи

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}; \vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}; \vec{J}_{\text{пр}} = \gamma \cdot \vec{E}, \quad (2)$$

где  $\mu = \mu_0 \mu_r$  – абсолютная магнитная проницаемость (Гн/м);  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная постоянная;  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость (Ф/м);  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0 = 1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^{-9})$  – электрическая постоянная;  $\vec{J}_{\text{пр}}$  – плотность тока проводимости;  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость

Из системы уравнений (1) можно выразить закон сохранения заряда [4]:

$$\operatorname{div} \vec{J} + \frac{d\rho}{dt} = 0. \quad (3)$$

Главными факторами влияния на точность результатов при расчете и анализе ВГ являются погрешности, связанные с воспроизведением геометрии объекта в модели и аппроксимацией нелинейных свойств материалов его областей.

Проблема оценки точности получаемого решения задачи содержит в себе достоверность математической модели, корректность использования МКЭ и погрешность реализации этого метода при формировании систем уравнений на ЭВМ. При этом весьма важны принимаемые допущения для исследования ВГ.

Основными источниками неточностей при постановке задачи являются некорректно выбранный тип конечных элементов или их размеры и некорректное задание граничных условий. При выборе конечного элемента необходимо учитывать степень аппроксимирующего полинома [1].

В общем случае  $\vec{J}$  состоит из  $\vec{J}_{\text{пр}}$ , а также из плотности тока смещения в диэлектрике, плотности стороннего тока и плотности тока переноса [6]. Кроме всего, основной величиной магнитного поля является векторный магнитный потенциал  $A$ , который имеет единственную  $\varphi$  компоненту, то есть  $A = (0, A_\varphi, 0)$ .

Электромагнитный расчет ВГ с использованием МКЭ проведем по следующему плану:

- выбор типа анализа и создание геометрии модели для МКЭ;
- выбор типа элементов, назначение свойств материалов и ввод свойств материалов;
- разбиение областей модели на сетку конечных элементов;
- приложение к модели граничных условий;

- выбор типа анализа электромагнитного поля, численное решение системы уравнений.

В задаче, реализованной программной системой конечно-элементного анализа ANSYS, для каждого воздушного зазора рассчитывается сила магнитного поля с помощью тензора Максвелла. Сила магнитного поля рассчитывается на каждый элемент воздушного слоя, прилегающего к верхнему магниту, а затем суммируется. Поэтому воздушный слой, окружающий объект, на который рассчитывается сила магнитного поля, должен моделироваться элементами сетки квадратного вида для получения более точных результатов.

В данном случае исследовалась осесимметричная 2-D модель ВГ (плоская постановка задачи). Для создания конечно-элементной модели использовался «элемент Plane53» и «потокпараллельное» граничное условие. Разработанная модель имеет 41 561 узел и 13 600 элементов, обладает 41 561 степенью свободы. Использование «потокпараллельного» граничного условия позволяет обеспечивать невыход за внешние границы модели эквипотенциальных линии магнитной индукции вблизи магнитной системы (см. рис. 2).

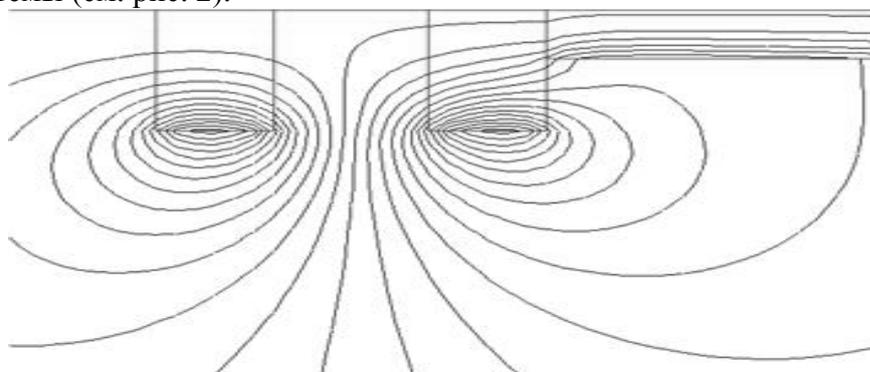


Рис. 2. Эквипотенциальные линии магнитной индукции при величине воздушного зазора  $\delta=0,05$  мм

Карта распределения величины магнитной индукции при заданной величине воздушного зазора представлена на рисунке 3.

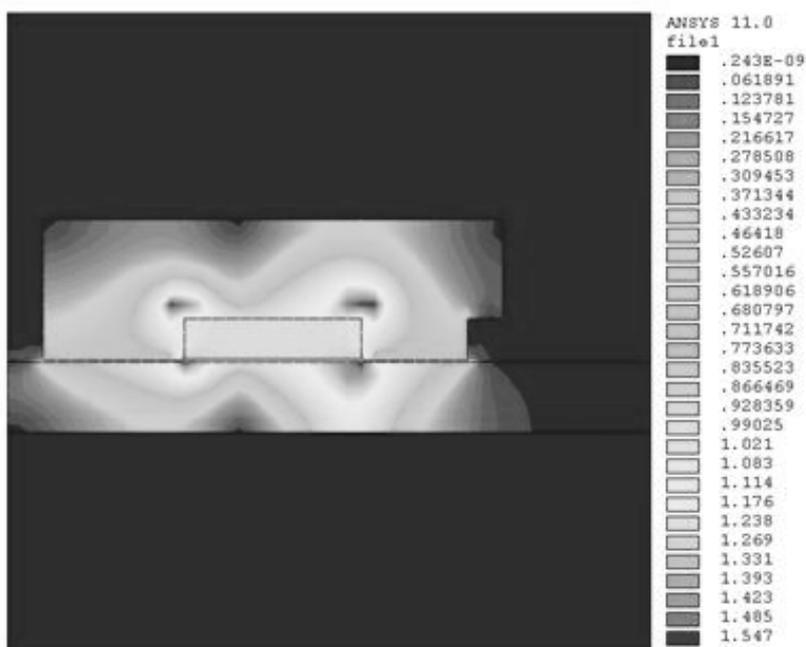


Рис. 3. 2-D карта распределения индукции  $B_{\delta}$  магнитного поля при величине воздушного зазора  $\delta=0.05$  мм

Точность вычислений силы магнитного поля, действующего на ферромагнитное основание генератора, зависит как от числа элементов по всей длине воздушного зазора, так и от самой длины воздушного зазора  $\delta$ . В этом месте модели наблюдаются скачки свойств материалов: постоянный магнит – воздух – ферромагнитный материал.

В магнитной системе исследуемого ВГ используются аксиально намагниченные постоянные магниты прямоугольной формы. Габаритные размеры постоянных магнитов определены из каталога готовых изделий [7; 8]. Изображение сечения активной зоны ВГ с постоянными магнитами и распределение магнитного поля представлено на рисунке 4.

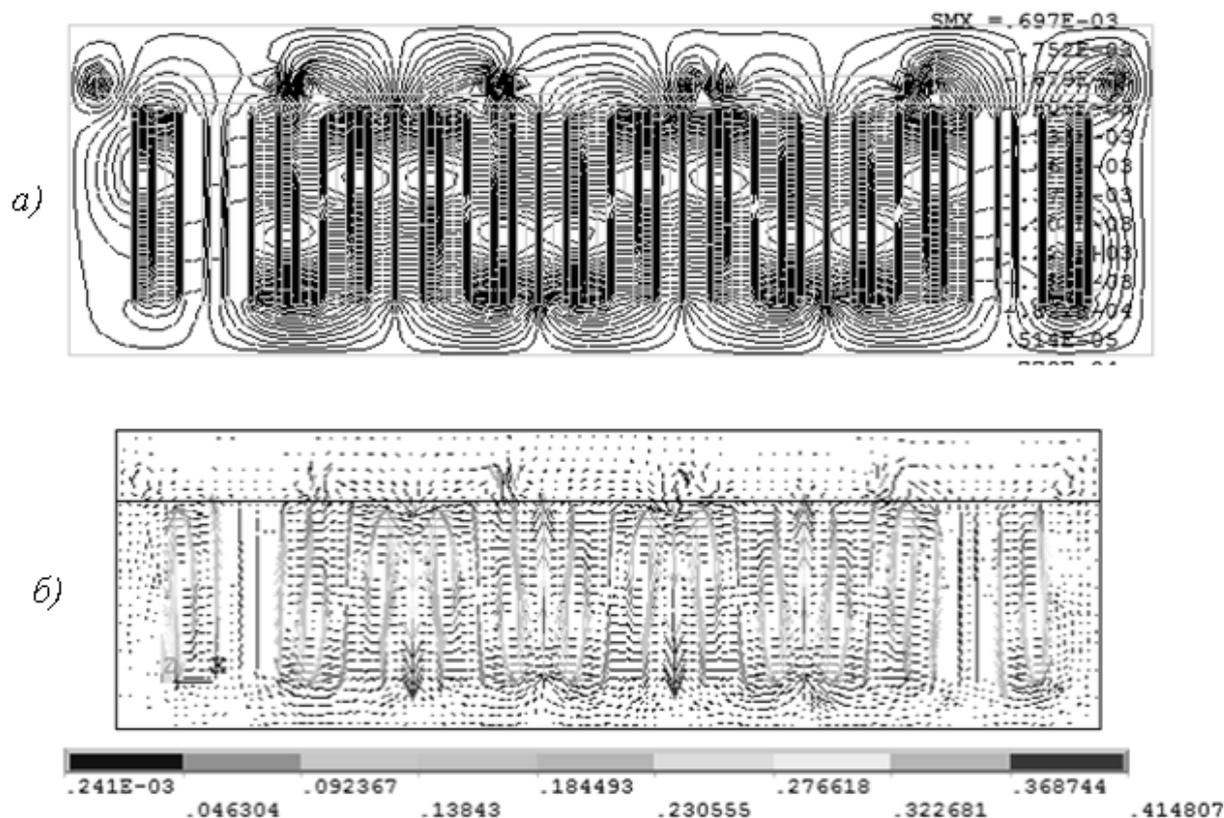


Рис. 4. Сечение активной зоны ВМГ (а) и распределение магнитного поля генератора (б)

При проведении конечно-элементного моделирования распределения магнитного поля генератора на зубчатой поверхности статора (см. рис. 5) использовался 2-D элемент (8-узловой), который рекомендуется применять при задании различных областей магнитной задачи: магнитов, обмоток, проводников, воздушного пространства и др. Контактный регион располагался посередине воздушного зазора. Целенаправленно создавались две независимые сетки. Верхняя область состояла из постоянных магнитов и верхнего воздушного пространства, нижняя область – из статора, обмоток и нижнего воздушного пространства.

Силовые линии результирующего магнитного поля замыкаются через ферромагнитные вставки, рабочие зазоры, ярмо магнитопровода статора и аксиально намагниченные постоянные магниты.

**Выводы.** Применение МКЭ для расчета магнитных полей ВГ обусловлено тем, что данный метод позволяет упростить вычисление производных потенциала на границах раздела сред с различными свойствами и ограничивающих область поверхностях. В ходе моделирования с помощью МКЭ главной задачей стало

определение структуры моделей, а именно выбор конечных элементов, описание физических свойств материалов конструкции генератора в различных областях.

Результаты расчета магнитной задачи в программном комплексе ANSYS позволяют отобразить характер распределения линий магнитного поля и оценить величину магнитной индукции. Проведенные исследования подтверждают тот факт, что расход активных материалов, в частности материала постоянных магнитов, возможно значительно уменьшить за счет выбора рационального соотношения геометрических размеров магнитной системы ВГ.

### ***Библиографический список***

1. *Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л.* Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989. 190 с.
2. *Домбровский В.В.* Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1983. 256 с.
3. *Коген-Далин В.В., Комаров Е.В.* Расчет и испытание систем с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1977. 248 с.
4. *Буль О.Б.* Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM. М.: Академия, 2005. 336 с.
5. *Williamson S., Smith A.C.* Pulsating torque and losses in multiphase induction machines // IEEE Transactions on Industry Applications. 2003. Vol. 39. № 4. P. 986–993.
6. *Тамоян Г.С., Сергеенкова Е.В.* Расчет линейных синхронных генераторов малой и средней мощности с постоянными магнитами // Актуальные вопросы современной техники и технологии: II-я Междунар. науч. заоч. конф. Липецк, 2010, С. 168–171.
7. «SUPERMAGNETE» [Сайт]. URL: <https://www.supermagnete.de> (дата обращения: 04.12.2018).
8. ООО «НПК «МАГНИТЫ И СИСТЕМЫ» [Сайт]. URL: [www.pmspb.ru](http://www.pmspb.ru) (дата обращения: 13.12.2018).