



**ЧУМАК В.В.**, канд. техн. наук,  
**КОВАЛЕНКО А.М.**, канд. техн. наук,  
**ПОНОМАРЕВ А.И.**, инж.,

Национальный Технический Университет Украины  
"Киевский политехнический институт им. И. Сикорского", г. Киев

## ТРЕХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

*Произведен анализ существующих математических моделей для расчета электромагнитного поля и оптимизации магнитоэлектрических синхронных генераторов с постоянными магнитами. Разработано трехмерную математическую модель на основе метода конечных элементов, исследовано влияние тока в подмагничивающей обмотке на внешние характеристики генератора при различном характере нагрузки.*

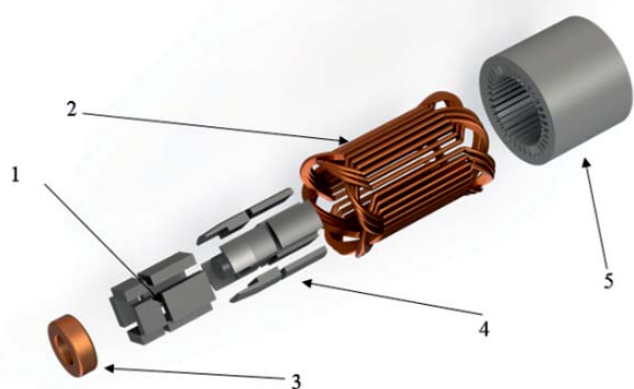
*К л ю ч е в ы е с л о в а:* трехмерная математическая модель, синхронный генератор, внешняя характеристика, подмагничивающая обмотка, магнитоэлектрическое возбуждение, малая гидроэнергетика.

**В**ведение. В настоящее время повышенное внимание уделяется развитию автономной электроэнергетики, которая во многих случаях обеспечивает решение важных технических проблем электроснабжения. Гидроэнергетика, также относится к автономным и возобновляемым источникам электроэнергии. В настоящее время в Украине находится в эксплуатации около 100 малых гидроэлектростанций. Они, в свою очередь, нуждаются в усовершенствовании и дополнительных капиталовложений для повышения своей эффективности. Помочь в решении данной задачи могут новые высокоэффективные магнитоэлектрические генераторы на постоянных магнитах.

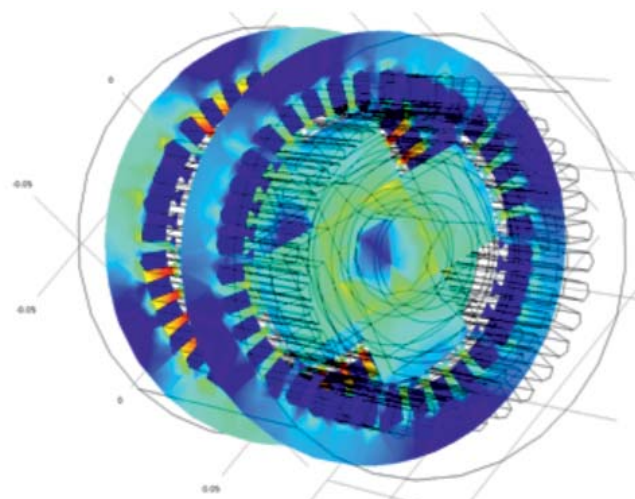
Электродгенераторы таких систем должны обладать повышенной надежностью, улучшенными динамическими качествами, малой массой и габаритными размерами. За прошедшие годы значительно изменились конструкции генераторов с постоянными магнитами, в связи с широким использованием высококоэрцитивной магнитов. Серийно выпускаемые электродгенераторы для автономных систем энергоснабжения, как правило, имеют возбуждение от постоянных магнитов,

широко применяются в авиации, наземных транспортных средствах и т.д. [1]. Можно прогнозировать дальнейшее быстрое развитие и внедрение бесконтактных электрических генераторов, поскольку они имеют ряд преимуществ. По сравнению со стандартными аналогами электродгенераторы с возбуждением от постоянных магнитов имеют большое разнообразие типов и вариантов конструктивного исполнения, в зависимости от широко варьируемых целей и условий работы.

Однако, синхронные генераторы с постоянными магнитами (СГПМ) имеют ряд принципиальных недостатков, которые существенно ограничивают область их применения и скорость внедрения. Во-первых, СГПМ практически не регулируемые, номинальное напряжение поддерживается в достаточно узком диапазоне внешней характеристики. Существующие методы стабилизации напряжения при скачках нагрузки [2] приводят к усложнению и удорожанию конструкции. Во-вторых, постоянные магниты таких генераторов имеют низкую механическую прочность и узкий рабочий температурный диапазон, что ограничивает применение таких генераторов на высоко-



**Рис. 1.** Общий вид исследуемого магнитоэлектрического СГПМ  
1 – постоянные магниты (NdFeBr-H-38);  
2 – трехфазная бмотка якоря; 3 – подмагничивающая обмотка;  
4 – магнитопровод ротора; 5 – магнитопровод статора.



**Рис. 2.** Распределение магнитной индукции

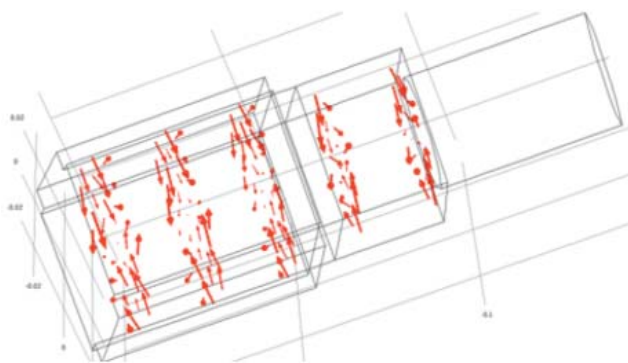


Рис. 3. Магнитный поток ротора при  $I_y = 0$

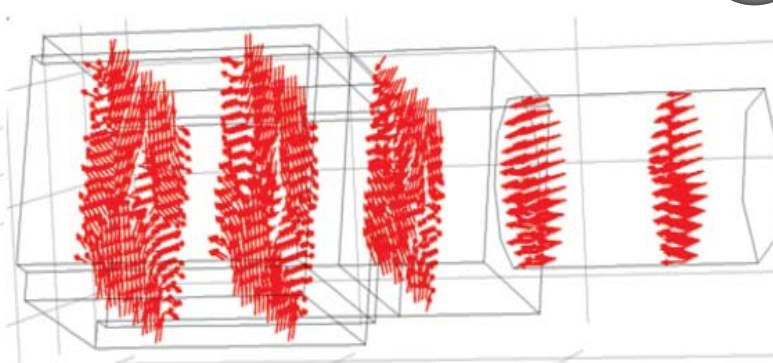


Рис. 4. Магнитный поток ротора при  $I_y = 1$  А

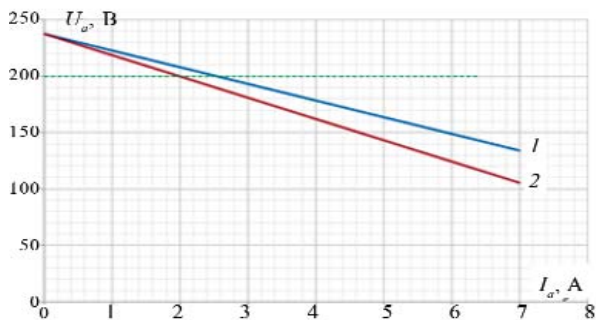


Рис. 5. Естественная внешняя характеристика

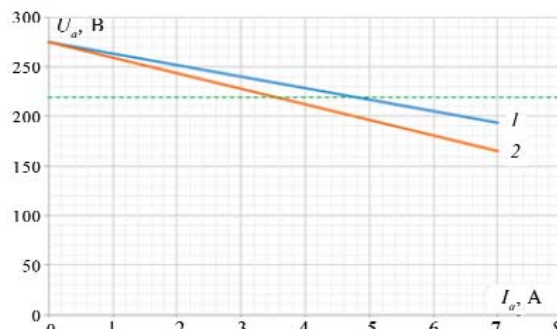


Рис. 6. Внешняя характеристика при регулировании

кие окружные скорости вращения и предельные повышения электромагнитных нагрузок.

Для борьбы со вторым недостатком применяются различные конструктивные методы и средства, позволяющие расширить область применения СГПМ [3].

Вопросу регулирования и поддержания напряжения при изменении нагрузки СГПМ посвящается огромное количество научных и практических трудов [2–4]. Однако, все существующие методы приводят к существенному удорожанию и усложнению конструкции СГ, а значит, к увеличению стоимости и снижению надежности.

Актуальным направлением является разработка бесконтактных СГПМ с магнитоэлектрическим возбуждением [5, 6] для систем малых гидроэлектростанций. В конструкциях такого типа роль регулятора основного магнитного потока выполняет дополнительная обмотка.

Целью статьи является разработка трехмерной полевой математической модели синхронного магнитоэлектрического генератора с постоянными магнитами для исследования характеристик генератора в различных режимах работы и оценки эффективности применения подмагничивающей обмотки, глубины регулирования напряжения.

Конструкция исследуемого генератора, выполненного на основе статора серийного

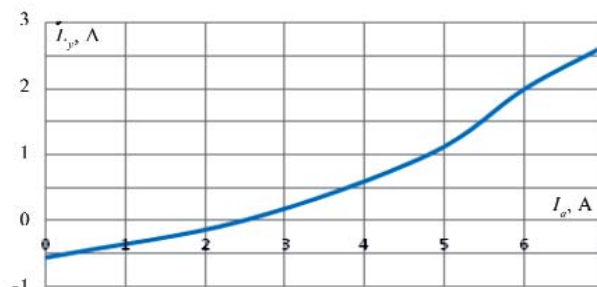


Рис. 7. Регулировочная характеристика

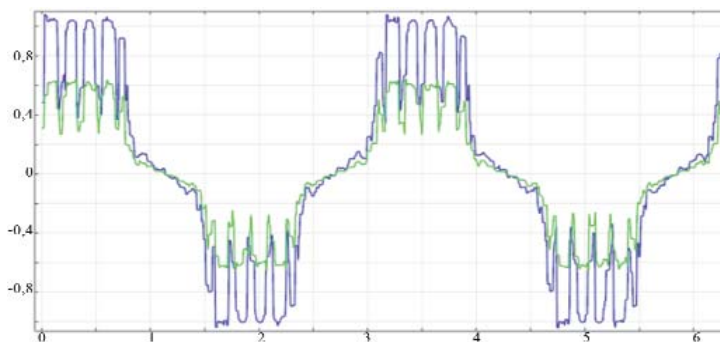


Рис. 8. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре

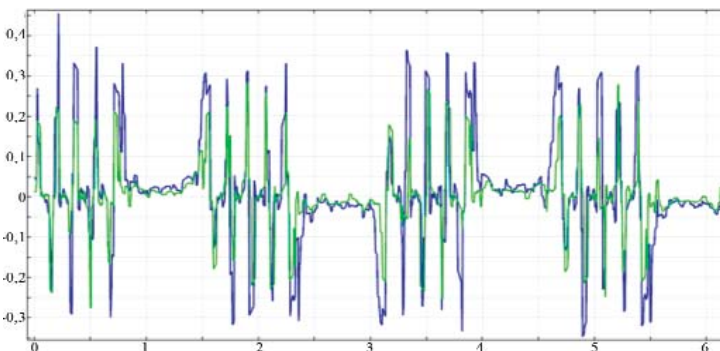


Рис. 9. Распределение тангенциальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре



электродвигателя АИР100L4, показана на Рис. 1.

Выбор, в качестве основы, трехмерной математической модели, обусловлен, тем, что существующие модели СГПМ [2–7] не учитывают трехмерный характер поля электрогенератора с подмагничивающей обмоткой. Так как данный класс электрических генераторов имеет радиально-осевой поток.

Основные преимущества трехмерной модели:

- учитывается влияние магнитных полей рассеяния лобовых частей;
- учитывается наличие межлистовой изоляции отдельных листов магнитопровода;
- учитываются продольные и поперечные концевые эффекты;
- учитываются конструктивные особенности магнитоэлектрического СГПМ, а именно наличие подмагничивающей обмотки;
- в полной мере позволяет проводить моделирование электрических машин с радиально-осевым потоком.

**Математическая модель.** При расчете магнитного поля использовалось нестационарное нелинейное дифференциальное уравнение для векторного магнитного потенциала ( $A$ ) в подвижной электропроводящей среде:

$$\bar{\nabla} \frac{1}{\mu} (\bar{\nabla} \times \vec{A}) - \gamma \frac{\partial A}{\partial t} + \gamma \vec{V} (\bar{\nabla} \times \vec{A}) = -J_{\text{стор}},$$

где  $\mu$ ,  $\gamma$  – магнитная проницаемость и электропроводность;  $\vec{V}$ ,  $J_{\text{стор}}$  – векторы скорости движения среды и сторонней плотности тока;  $\bar{\nabla}$  – Дифференциальный Набла-оператор.

Поскольку расчетная область машины имеет различные физические свойства, то в каждой из областей решается стационарное уравнение поля относительно векторного магнитного потенциала. Для области, которая включает в себя воздушный промежуток, магнитопровод, вал, полюсные наконечники и обмотку якоря уравнение имеет следующий вид:

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \frac{\nabla \times A}{\mu_0 \mu_r} = J_e$$

где  $J_e$  – плотность токов в обмотке статора, характеризующая режим работы генератора;  $\sigma$  – электропроводность материалов области;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материалов.

Магнитное поле постоянных магнитов рассчитывается следующим уравнением:

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \frac{\nabla \times A - B_r}{\mu_0 \mu_r} = J_e$$

где  $B_r$  – остаточная индукция постоянных магнитов.

Плотность тока в обмотке якоря задается как функция времени и принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} J_A &= J_m \cos(\omega_1 t), \\ J_B &= J_m \cos(\omega_1 t + 2\pi/3) \\ J_C &= J_m \cos(\omega_1 t + 4\pi/3) \end{aligned}$$

где  $J_m$  – амплитудное значение плотности тока в фазе обмотки якоря, которое определяется токовой нагрузкой паза генератора (величиной тока якоря, числом витков и площадью сечения паза).

Для расчета индуцированной ЭДС в фазе обмотки якоря генератора, в среде COMSOL Multiphysics используется следующее интегральное выражение:

$$E_A = \frac{LU_{\Pi}}{S_{\Pi} a} \left( \oint_{S_q} E_{zA} ds - \oint_{S_q} E_{zX} ds \right)$$

где  $L$  – осевая длина генератора;  $U_{\Pi}$  – количество витков в пазу;  $S_{\Pi}$  – площадь в пазу под проводники;  $E_{zA}$ ,  $E_{zX}$  – напряженность электрического поля в месте расположения катушек фазных зон "А" и "х";  $S_q$  – площадь, занимаемая проводники одной фазной зоны;  $a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря. Аналогично определяются ЭДС в фазах обмотки "В" и "С".

Для получения однозначного решения на границах расчетной области задаются граничные условия первого рода:

$$A(x, y, z, t) |_{G_1} = 0, \{x, y, z\} \in G_1$$

### Результаты моделирования.

На Рис. 2 представлено распределение магнитной индукции в расчетной области исследуемого СГПМ в двух сечениях.

Исследование данного генератора производилось для двух режимов работы: 1) без тока в обмотке подмагничивания; 2) с током в обмотке подмагничивания, при активном характере нагрузки и активно-индуктивном с  $\cos \varphi = 0,95$ .

При отсутствии тока в подмагничивающей обмотке ( $I_y = 0$  А) данный генератор имеет все свойства синхронного генератора с радиальным потоком, осевая составляющая магнитного потока, которая замыкается через вал  $\approx 0$  (Рис. 3).

При наличии постоянного тока управления в подмагничивающей обмотке величиной  $I_y = 1$  А,





картина поля в роторе изменяется, поскольку является осевая составляющая потока (Рис. 4).

На Рис. 5 показано естественную внешнюю характеристику.

На Рис. 5: 1 — внешняя характеристика при  $\cos \varphi = 1$ ; 2 — внешняя характеристика при  $\cos \varphi = 0,95$ .

Видно, что при номинальном токе нагрузки  $\approx 6,8$  А падение напряжения составляет от 93 В до 115 В при активно-индуктивной нагрузке.

При наличии тока управления в подмагничивающей обмотке внешняя характеристика имеет вид как на Рис. 6.

При наличии постоянного и неизменяющегося тока в обмотке управления (подмагничивающей) при номинальном токе нагрузки отклонение напряжения от номинального составляет  $\approx$  от 30 В до 50 В при активно-индуктивной нагрузке.

Таким образом полученную математическую модель целесообразно использовать не только для оценки эффективности применения данного способа регулирования напряжения но и для синтеза закона управления током в подмагничивающей обмотке при различном характере нагрузки.

Задаваясь током в обмотке управления и в обмотке якоря, производится серия расчетов с последующим определением напряжения  $U_a$  на выходе. Результат такого расчета и регулировочная характеристика при активной нагрузке показана на Рис. 7.

Из Рис. 7 видно, что от режима холостого хода до нагрузки  $\approx 2,5$  А, регулятор напряжения должен выполнять реверс тока в подмагничивающей обмотке. При этом магнитный поток, созданный постоянными магнитами, замыкается не через статор и ротор, а по магнитной системе ротора, суммарный поток уменьшается и поддерживается постоянное напряжение на зажимах генератора. Существует семейство подобных регулировочных характеристик, построенных для каждого типа нагрузки: активной, активно-индуктивной, активно-емкостной.

На Рис. 8 показано распределение нормальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре для двух случаев: 1 — при отсутствии тока в подмагничивающей обмотке; 2 — когда  $I_y = 1$  А.

Верхняя кривая соответствует режиму, когда  $I_y = 1$  А, нижняя построенная при  $I_y = 0$  А. Ампли-

туды полученных кривых отличаются  $\approx 40$  %, в виду того, что обмотки имеет асимметричное расположение, среднее значение составляет  $\approx 20$  % в режиме холостого хода.

Тангенциальная составляющая влияет на величину электромагнитного момента. С помощью разработанной модели получено распределение тангенциальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре, что показано на Рис. 9.

Верхняя кривая соответствует режиму  $I_y = 1$  А, нижняя  $I_y = 0$  А. На основании Рис. 9 можно сделать вывод, что поток дополнительной обмотки практически не влияет на величину электромагнитного момента.

**Выводы.** Разработанная трехмерная полевая математическая модель полностью учитывает особенности конструкции исследуемого СГПМ, наличие радиально-осевого магнитного потока и представляет адекватный результат. С помощью модели разработано методологическое обеспечение для системы автоматического регулирования напряжения исследуемого генератора.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Чумак В.В., Пономарев А.И. Синхронный генератор с комбинированным возбуждением // Энергия — XXI век. — 2013. — № 1. — С. 28–34.
2. Монахов Е.А., Чумак В.В. (2015), "Методика расчета магнитной системы торцевых синхронных магнитоэлектрических генераторов" / Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. — № 1 (90). — С. 23 — 26.
3. Чумак В.В. Математическое моделирование генератора с комбинированным возбуждением автономной энергоустановки / В.В. Чумак, М.А. Коваленко, А.И. Пономарев // Электромеханические и энергосберегающие системы. — 2015. — № 31. — С. 76 — 84.
4. Пат. 99684 Україна, МПК Н 02 К 21/14. Синхронный генератор з комбінованим збудженням / Богаєнко М.В., Попков В.С., Чумак В.В.; заявник і патентовласник Богаєнко М.В., Попков В.С., Чумак В.В.; заявл. 03.10.11; опубл. 10.09.12, Бюл. №17.
5. Chalmers B.J., Spooner E. (1999), "Anaxial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system", Energy Conversion, IEEE Transactions. — Vol. 14, no. 2. — P. 251–257.
6. Kanerva S. "Inductance Model for Coupling Finite Element Analysis With Circuit Simulation," / S. Kanerva, S. Seman and A. Arkkio // IEEE Transactions on Magnetics. — Vol. 41. — No. 5, 2005. — P. 1620–1623.
7. Kovacs G., Kuczmann M. Simulation and measurement of magnetic based nondestructive tester: Journal of Advanced Research in Physics 2:(1), 2011, Paper 011104.

© Чумак В.В., Коваленко М.А., Пономарев А.И., 2016

