

УДК 621.313.821

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ**В. В. Чумак, М. А. Коваленко**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: chumack_kpi@ukr.net**А. И. Пономарев**Общество с ограниченной ответственностью «ВИПСЕРВИСПЛЮС»
просп. Воздухофлотский, 72, Киев, 03151, Украина.

Разработки постоянных магнитов, обладающих высокой энергией и небольшими габаритами, побуждают к развитию и активному использованию автономных высокоэффективных генераторов с постоянными магнитами. Актуальным является применение бесконтактных генераторов такого типа с подмагничивающей обмоткой, применение которой позволяет в широком диапазоне нагрузки стабилизировать рабочее напряжение. Целью исследования является разработка полевой математической модели генератора и оптимизация рабочей зоны его ротора. Численное решение поставленной задачи производилось в программном пакете COMSOL Multiphysics. Статор исследуемого генератора выполнен на базе серийного асинхронного двигателя типа АИР100L4. Разработанная модель позволяет получить распределение электромагнитного поля в расчетной области генератора, оценить качество индуцированной электродвижущей силы и величину потоков рассеивания генератора, а также рассчитывать характеристики генератора при его вращении, при этом все зависимые величины являются функцией времени. С помощью разработанной модели выполнена параметрическая оптимизация рабочей зоны ротора с целью минимизации потоков рассеивания машины, увеличения КПД и повышения удельной мощности, что повысит эффективность и снизит стоимость бесконтактной системы подмагничивания и стабилизации выходного напряжения генератора. В процессе исследования получено распределение суммарного электромагнитного поля для двух крайних режимов: холостого хода и номинальной нагрузки. В работе предложена методика отделения поля рассеивания генератора от основного потока и полного. Это позволило определить оптимальное соотношение между размерами полюсного наконечника и постоянных магнитов. Целесообразно выбирать высоту магнита как можно больше, исходя из требований к конструкции, заданной механической прочностью и скорости вращения магнитоэлектрического генератора.

Ключевые слова: постоянные магниты, магнитоэлектрический генератор, математическая модель, оптимизация, комбинированное возбуждение.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАТОРА З КОМБІНОВАНИМ ЗБУДЖЕННЯМ АВТОНОМНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ**В. В. Чумак, М. А. Коваленко**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. E-mail: chumack_kpi@ukr.net**О. І. Пономарьов**Товариство з обмеженою відповідальністю «ВИПСЕРВИСПЛЮС»
просп. Повітрофлотський, 72, Київ, 03151, Україна.

Розробки постійних магнітів, що володіють високою енергією й невеликими габаритами, спонукають до розвитку та активного використання автономних високоефективних генераторів із постійними магнітами. Актуальним є застосування бесконтактних генераторів такого типу з підмагнічувальною обмоткою, застосування якої дозволяє в широкому діапазоні навантаження стабілізувати робочу напругу. Метою дослідження є розробка польової математичної моделі генератора та оптимізація робочої зони його ротора. Чисельне рішення поставленої задачі вироблялося в програмному пакеті COMSOL Multiphysics. Статор досліджуваного генератора виконаний на базі серийного асинхронного двигуна типу АИР100L4. Розроблена модель дозволяє отримати розподіл електромагнітного поля в розрахунковій області генератора, оцінити якість індукованої електричної сили й величину потоків розсіювання генератора, а також розраховувати характеристики генератора при його обертанні, при цьому всі залежні величини є функцією часу. За допомогою розробленої моделі виконано параметричну оптимізацію робочої зони ротора з метою мінімізації потоків розсіювання машини, збільшення ККД і підвищення питомої потужності. Це підвищить ефективність і знизить вартість бесконтактної системи підмагнічування й стабілізації вихідної напруги генератора. У процесі дослідження отримано розподіл сумарного електромагнітного поля для двох крайніх режимів: холостого ходу й номінального навантаження. У роботі запропоновано методіку відділення поля розсіювання генератора від основного потоку й повного. Це дозволило визначити оптимальне співвідношення між розмірами полюсного наконечника й постійних магнітів. Доцільно вибирати висоту магніту якомога більше, виходячи з вимог до конструкції, заданої механічної міцності й швидкості обертання магнітоелектричного генератора.

Ключові слова: постійні магніти, магнітоелектричний генератор, математична модель, оптимізація, комбіноване збудження.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В общем случае автономная энергетическая установка состоит из первичной приводной системы (чаще всего двигатель внутреннего сгорания (ДВС)) и генератора, как правило, синхронного, с электромагнитным возбуждением. Характерной особенностью работы системы на основе ДВС является диапазон работы нагрузок от 0,5 до 1,2 номинальной мощности. Следовательно, внешняя характеристика синхронного генератора должна быть рассчитана на напряжение холостого хода, близкое к напряжению при работе с нагрузкой $\approx 50\%$. В таком случае диапазон изменения внешней характеристики с учетом нормативных требований к автономным энергокомплексам (поддержка напряжения $\pm 10\%$) должен составлять от 200 до 240 В при нагрузке от 0,5 до 1,2 номинальной мощности. Это обстоятельство упрощает задачу стабилизации внешней характеристики для генераторов с возбуждением от постоянных магнитов с электромагнитным шунтированием [1–6].

Использование синхронных генераторов с постоянными магнитами (СГПМ) расширяется с появлением новых областей их применения, а также с разработкой новых магнитов, которые обладают улучшенными характеристиками. СГПМ отличаются относительно высоким значением КПД, но трудно регулируются. Одним из вариантов стабилизации внешней характеристики является использование магнитных шунтов. В работе рассматривается синхронный генератор (СГ) с магнитным шунтом на роторе, выполненный на базе серийного асинхронного двигателя (АД) АИР100L4. В качестве базового выбран АД по нескольким причинам: во-первых, АД являются серийными, что, в свою очередь, означает, что они оптимизированы; во-вторых, использование статоров АД для СГ означает унификацию генераторов. Используется данный генератор для высокоэффективных автономных энергоустановок переменного тока. Продольный эскиз СГ приведен на рис. 1 [1].

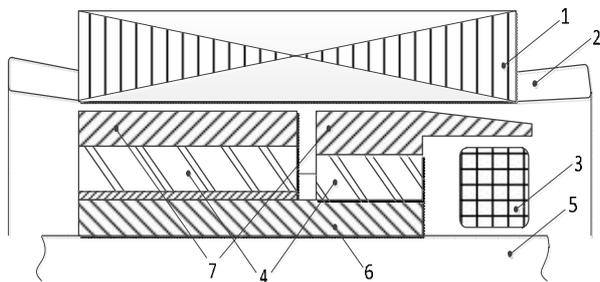


Рисунок 1 – Эскиз СГПМ с магнитным шунтом

На рис. 1 введены следующие обозначения: 1 – магнитопровод статора; 2 – обмотка якоря; 3 – подмагничивающая обмотка; 4 – постоянные магниты; 5 – вал; 6 – втулка; 7 – полюсные наконечники.

На статоре генератора размещена трехфазная распределенная обмотка якоря. Ротор СГ состоит из двух частей: радиально намагниченных постоянных магнитов (четыре полюса), которые создают рабо-

чий магнитный поток; магнитного шунта (вспомогательная часть СГПМ), предназначенного для стабилизации внешней характеристики СГПМ ($\pm 10\%$, ГОСТ 13109–97, от источников-преобразователей) и для целей регулирования выходного напряжения в широких пределах [5]. В соответствии с действующими нормативами, максимальные отклонения действующего напряжения во всем диапазоне рабочего тока и характера нагрузки ($\cos\varphi=1$, $\cos\varphi=0,9$), отклонение напряжения генератора должно находиться в пределах 198–242 В.

К преимуществам СМПМ с магнитным шунтом относятся: высокая надежность в работе благодаря отсутствию скользящих контактов и щеток возбуждателя, отсутствие потерь на возбуждение, независимость от источников постоянного тока, высокий КПД. Основными недостатками таких машин является отсутствие прямого способа регулирования напряжения и относительно низкая максимальная мощность машины (до 100 кВт·А).

Исследуемый СГПМ характеризуется следующими номинальными данными: мощность $P_n=4,0$ кВт, фазное напряжение $U_f=220$ В, число пар полюсов $p=4$, частота вращения $n=1500$ об/мин, частота выходного напряжения $f=50$ Гц, материал постоянных магнитов NdFeBr–H–38.

Целью исследования является разработка полевой математической модели СГПМ и оптимизация рабочей зоны его ротора. Для экономии аппаратных ресурсов ПЭОМ рассматривается поперечное сечение рабочей части ротора и сечение статора.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для решения поставленной задачи разработана двухмерная полевая математическая модель исследуемого СГПМ в поперечном сечении. Расчетная область генератора показана на рис. 2.

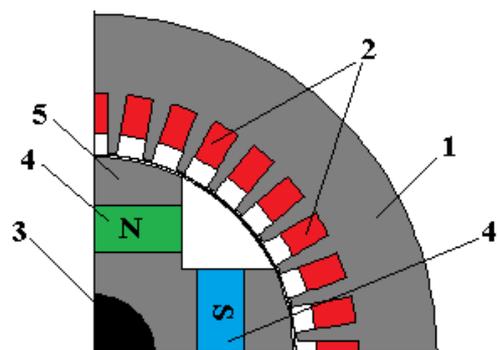


Рисунок 2 – Расчетная область исследуемого генератора

На рис. 2: 1 – магнитопровод якоря; 2 – обмотка якоря; 3 – вал; 4 – постоянные магниты; 5 – полюсные наконечники. Полярность постоянных магнитов обозначена соответствующими символами.

Проведены литературный поиск и анализ существующих математических моделей синхронных генераторов с постоянными магнитами. В результате оказалось, что в существующих моделях [4, 6–9] не в полной мере учитывается сложная конфигурация расчетной области, присущая унифицированной

конструкції прототипа, а параметри постійних магнитов ограничиваются заданием остаточной магнитной индукции B_r для выбранного класса постоянных магнитов. Поэтому в предложенной модели используется полноценная возвратная кривая используемых NdFeBr магнитов. Также в существующих моделях и методиках [7, 10] отсутствует методология разделения суммарного магнитного потока на рабочий поток и поток рассеивания. Известные модели используют [2, 5] динамическую модель генераторов с постоянными магнитами, что повышает время решения поставленной задачи (по сравнению с квазистационарной задачей) в 2–3 раза и завысит, в конечном итоге, от заданного временного интервала расчета. В разработанной модели предлагается способ уменьшения времени расчета модели.

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 зазор, магнитопровод, вал, полюсные наконечники и обмотку якоря, уравнение имеет следующий вид:

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times \frac{\nabla \times A}{\mu_0 \mu_r} = J_e, \quad (1)$$

где J_e – плотность токов в обмотке статора, характеризующая режим работы генератора; σ – электропроводность материалов области; μ_r – относительная магнитная проницаемость материалов.

Поле постоянных магнитов рассчитывается по стационарному уравнению

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times \frac{\nabla \times A - B_r}{\mu_0 \mu_r} = J_e, \quad (2)$$

где B_r – остаточная индукция постоянных магнитов.

Для повышения сходимости решения задачи рекомендуется задавать некоторое значение электропроводности для расчетной области. Серии расчетов показали, что повышения сходимости решения задачи рекомендуется задавать значение электропроводности $\sigma = 10^{-6} \sigma_m$ (σ_m – электропроводность материала). Таким образом, время одного расчета модели на заданном временном интервале, который составляет 2·T (T=0,04 с), сокращается на ≈40 %.

Плотности токов в обмотке якоря задаются как функция времени t :

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

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

Вращение моделируется в программном пакете COMSOL Multiphysics с помощью физического интерфейса для вращающихся машин. Ротор с магнитами и часть воздушного зазора вращается по отношению к системе координат статора. Ротор и статор выполняются в виде двух отдельных геометрических объектов, на границе которых задается

условие непрерывности векторного магнитного потенциала.

Для расчета индуцированной электродвижущей силы (ЭДС) в фазе обмотки якоря генератора в среде COMSOL Multiphysics используется следующее интегральное выражение:

$$E_A = \frac{LU_n}{S_{II}a} \left(\oint_{S_a} E_{zA} ds - \oint_{S_a} E_{zX} ds \right), \quad (4)$$

где L – осевая длина генератора; U_n – количество витков в пазу; S_n – площадь в пазу под проводники; E_{zA} , E_{zX} – напряженность электрического поля в месте расположения катушек фазных зон "А" и "х"; S_q – площадь, которую занимают проводники одной фазной зоны; a – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Аналогично определяются ЭДС в фазе обмотки "В" и "С".

Существует два способа для расчета электромагнитных сил и моментов [7]. Первый метод заключается в использовании тензора напряжений Максвелла, или тензора магнитного натяжения. Другой метод, который чаще всего используется для особого случая расчета магнитных сил на немагнитных, токоведущих областях, использует определенную физическую переменную для распределения силы Лоренца в плотности магнитного потока. Для задач, в которых существуют определенные значения токов, сила рассчитывается путем интеграции тензора магнитного натяжения на поверхности объекта, на который действует сила (средняя линия в воздушном зазоре):

$$n_1 T_2 = -\frac{1}{2} n_1 (ED) + (n_1 E) D^T; \quad (5)$$

$$n_1 T_2 = -\frac{1}{2} n_1 (HB) + (n_1 E) B^T. \quad (6)$$

В выражениях (5) и (6): E – вектор напряженности электрического поля; D – вектор диэлектрического смещения; H – напряженность магнитного поля; B – вектор магнитной индукции, n_1 – нормаль к поверхности.

Приведенные выше уравнения могут быть использованы для вычисления мгновенных значений силы и крутящего момента, например для определения временной зависимости электромагнитного момента магнитоэлектрического синхронного генератора с постоянными магнитами. В таком случае усредненное значение электромагнитного момента методом тензора магнитных натяжений принимает следующий вид [8]:

$$\begin{aligned} n_1 T_{av} &= \frac{1}{2} Re \left(-\frac{1}{2} n_1 (ED) + (n_1 E) D^T - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} n_1 (HB) + (n_1 E) B^T \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Конечное выражение для определения электромагнитного момента исследуемого генератора можно представить в виде уравнения

$$M_{ЭМ} = \frac{2pR_2 L_2}{\mu_0} \int_0^\tau B_n B_\tau dl, \quad (8)$$

где B_n , B_τ – нормальная и тангенциальная составляющие магнитной индукции к поверхности ротора; R_2 , L_2 – радиус и длина исследуемого генератора; p – количество пар полюсов; τ – величина полюсного деления ротора.

Решение электромагнитного поля, ЭДС и электромагнитного момента производится на каждом временном интервале Δt . Объединение полученных решений на интервале $[0 \dots T]$ дает искомые временные зависимости $E_f(t)$ и $M_{эм}(t)$.

Для реализации вращения в модели используется автоматический генератор сетки, который перестраивает сетку конечных элементов для каждого временного интервала Δt [9]. Для реализации данного алгоритма вводится дополнительная система координат – цилиндрическая. При этом выражения для определения аксиальной и радиальной составляющих индукции постоянных магнитов в воздушном зазоре в цилиндрической системе координат показаны ниже:

$$B_r = \sum_{n=1}^{\infty} B_r^{(n)} \cos(p(n\theta - \gamma)); \quad (9)$$

$$B_\theta = \sum_{n=1}^{\infty} B_\theta^{(n)}(r) \sin(p(n\theta - \gamma)). \quad (10)$$

Для корректной работы модели на средней линии воздушного зазора задается условие непрерывности векторного магнитного потенциала.

Для получения однозначного решения на границах расчетной области задаются граничные условия первого рода [10]:

$$A(x,y,z,t)|_{G1}=0. \quad (11)$$

Численное решение поставленной задачи производилось в программном пакете COMSOL Multiphysics. Сетка конечных элементов модели состоит из 15094 треугольных элементов. Среднее время решения поставленной задачи составляет 195 мин.

На рис. 3 показано распределение магнитной индукции и векторного магнитного потенциала в режиме холостого хода генератора. Максимальное значение индукции в зубцах составляет $\approx 1,73$ Тл.

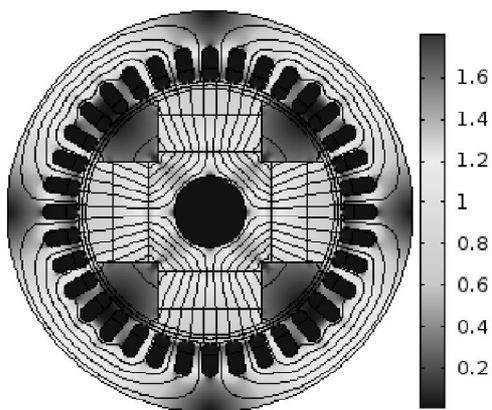


Рисунок 3 – Распределение электромагнитного поля генератора

Распределение нормальной составляющей индукции в воздушном зазоре в области двух полюсов и индуцированной ЭДС в трехфазной обмотке якоря показано на рис. 4.

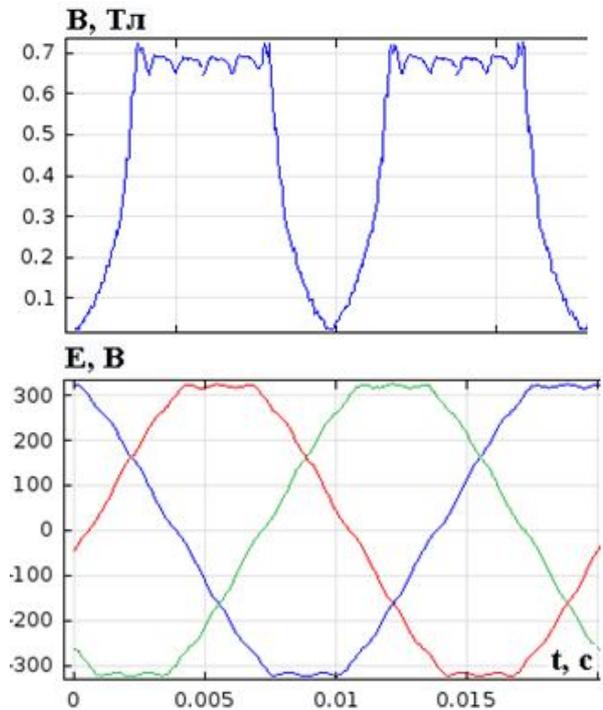


Рисунок 4 – Распределение индукции в воздушном зазоре и ЭДС в обмотке статора

Пульсации магнитной индукции в воздушном зазоре на холостом ходу обусловлены зубчатостью якоря, а также наличием поперечных концевых эффектов. Влияние этих явлений на процессы, параметры и показатели генератора являются актуальным направлением для последующих исследований и в данной работе не рассматривается.

Для оценки качества индуцированного напряжения выполнен анализ спектра трехфазной ЭДС на холостом ходу. Для этого полученная кривая фазного напряжения раскладывается в спектр с помощью быстрого преобразования Фурье. Результат разложения представлен на рис. 5 и представляет собой спектральный состав расчетной кривой.



Рисунок 5 – Спектральный состав ЭДС

В полученном спектре на рис. 5 отчетливо выражены ЭДС 3-й, 5-й и 7-й гармоник. Относительно амплитуды первой гармоники они составляют: 7,8, 6,6, 5,4 % соответственно для 3-й, 5-й и 7-й гармоник. При соединении обмоток в звезду или треугольник третьи гармоники пропадают. Для компенсации 5-й и 7-й гармоник обмотку необходимо выполнять укороченной. ЭДС других гармоник не превышают 5 % от первой.

При использовании NdFeBr магнитов с остаточной индукцией порядка $B_r \approx 1,31$ Тл среднее значение индукции в воздушном зазоре составляет 0,773 Тл, что является хорошим результатом для машины с радиально намагниченными постоянными магнитами. Амплитудное значение фазной ЭДС первой гармоники на холостом ходу – 332 В, что составляет $1,07 \cdot U_n$. Таким образом, можно считать результаты моделирования вполне реальными, а саму модель адекватной. Пульсации индуцированной ЭДС обусловлены зубчатостью статора и явнополюсной конструкцией ротора, а также выбранным шагом расчета и качеством сетки конечных элементов.

Проведены численные расчеты исследуемого генератора в режиме номинальной нагрузки для определения действия реакции якоря и расчета полей рассеивания в режиме номинальной нагрузки. При номинальной нагрузке величина индуцируемой ЭДС снижается на $\approx 17\%$, а само поле в воздушном зазоре существенно искажается.

Распределение электромагнитного поля и векторного магнитного потенциала СГПМ в режиме номинальной нагрузки показано на рис. 6.

В номинальном режиме генератор должен работать с $\cos \varphi$, максимально близким к единице. По методике, предложенной в [2], рассчитан коэффициент мощности в режиме номинальной нагрузки. Фазовый угол смещения между током и напряжением составляет 29 электрических градусов, что соответствует $\cos \varphi = 0,89$.

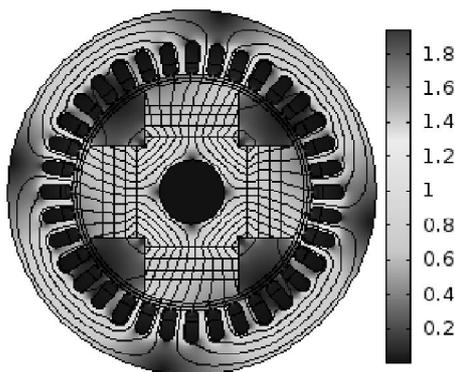


Рисунок 6 – Фрагмент поля при номинальной нагрузке

Поскольку статор исследуемого генератора является унифицированным с АД типа АИР100L4, то в работе проводится оптимизация рабочей зоны ротора. Задача оптимизации заключается в минимизации полей рассеивания генератора. Это достигается

варьированием высоты постоянных магнитов с целью удешевления конечной стоимости исследуемого СГПМ и получения максимальной величины индуцированной ЭДС на холостом ходу. Для оценки величины полей рассеивания рассматриваются две задачи. Сначала косвенно определяется значение рабочего магнитного потока Φ_p , которое соответствует основной гармонике ЭДС на холостом ходу. Затем решается задача, в которой блокируются пути для замыкания магнитных полей рассеивания. Таким образом определяется максимальный (суммарный) магнитный поток, который создают постоянные магниты Φ_m . Разница потоков $\Phi_m - \Phi_p = \Phi_\sigma$ дает значение магнитных потоков рассеивания. Аналогичный расчет производится для режима номинальной нагрузки. Таким образом, соотношение высоты магнита и полюсного башмака b_n/b_σ , которое обеспечивает минимальное значение потока рассеивания Φ_σ , считается оптимальным.

При радиальном намагничивании постоянных магнитов межполюсное пространство заполняется прочным немагнитным составом, который придает конструкции необходимую механическую прочность и служит базой для размещения постоянных магнитов и полюсных наконечников, поэтому ширина магнитов остается постоянной. К тому же увеличение ширины магнитов приведет к увеличению полей рассеивания.

Соотношение параметров, при котором $b_n/b_m = 1$, взято из чертежей и конструкторской документации на изготовленный образец магнитоэлектрического генератора [3]. Варьируемым параметром является высота постоянных магнитов b_m . Верхний и нижний пределы обусловлены конструктивными ограничениями и требованиями к механической прочности.

В табл. 1 приведено значение потоков генератора на холостом ходу.

Таблица 1 – Значения потоков на холостом ходу

В, Тл	b_n/b_m , о.е.	$\Phi_p/\Phi_m/\Phi_\sigma$	E_m , В
		Вб XX	
0,63	0,35	0,002949/0,003315/3,66*10 ⁻⁴	256
0,773	1	0,003623/0,004005/3,82*10 ⁻⁴	332
0,847	2,75	0,003964/0,004358/3,944*10 ⁻⁴	364

Сравнение полученных значений магнитных потоков со значениями, полученными ранее на основании расчета магнитной цепи [4], показывают, что сходимость результатов находится в области 5–10 %, что в целом подтверждает адекватность разработанной модели, полученных результатов и правильности принятых допущений.

В табл. 2 приведені результати розрахуку магнітних потоків при чисто активному характері навантаження, при якому номінальний ток досліджуваного генератора становить ≈ 6 А.

Таблиця 2 – Значення потоків при номінальній навантаженні

b_n/b_m , о.е.	$\Phi_p/\Phi_m/\Phi_\sigma$ Вб	t_z , Тл
	$I=I_n$	
0,35	0,002825/0,003207/3,82*10 ⁻⁴	1,26
1	0,003519/0,003939/4,2*10 ⁻⁴	1,43
2,75	0,003895/0,004319/4,24*10 ⁻⁴	1,51

Залежність суммарного і робочого магнітного потоку від відносного розміру магнітів показана на рис. 7.

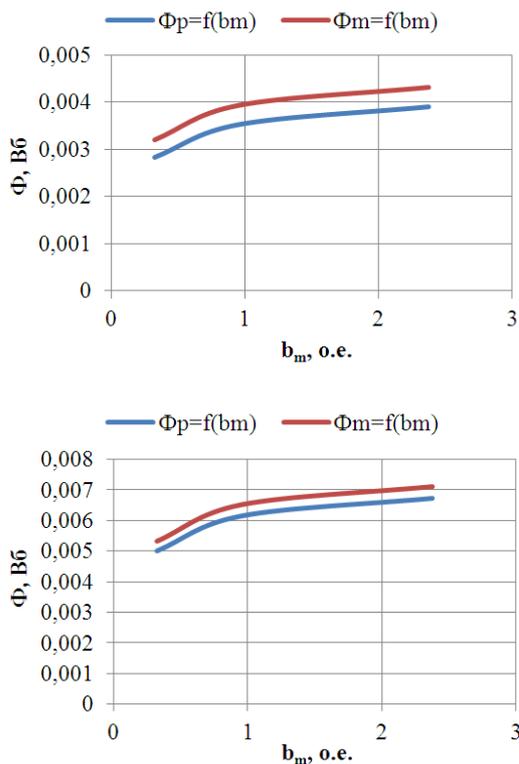


Рисунок 7 – Залежність магнітних потоків від відносного розміру магнітів

На рис. 7 видно, що з збільшенням висоти магніта збільшується значення робочого потоку і одночасно збільшується величина потоків розсіювання. Однак потоки розсіювання при збільшенні висоти магнітів в $\approx 2,75$ рази зростають

всього на $\approx 7,7$ %. Це пояснюється тим, що відносна магнітна проникність постійних магнітів практично рівна проникності повітря і збільшення висоти магнітів не приводить до суттєвому збільшенню потоків розсіювання.

З ростом навантаження величина потоків розсіювання зростає на $\approx 5-10$ %, що пояснюється збільшенням продольної і поперечної складової магнітного поля реакції якоря.

При максимально можливому збільшенні висоти постійних магнітів ($b_n/b_m=2,75$) індукція в повітряному зазорі зростає на $\approx 9,5$ %, однак це не приводить до збільшенню середньої індукції в зубцях статора вище рекомендованого значення (1,7–1,8 Тл). Збільшення висоти магнітів до заданого значення приводить до збільшенню амплітуди ЕДС в обмотці якоря на 9,6 %, що підтверджує адекватність розробленої полевой математической модели.

На рис. 8 приведено результат розрахуку зовнішньої характеристики магнітоелектрического генератора з постійними магнітами для конструктивних варіантів генератора, приведених в табл. 1, 2. Розрахунок величини напруги в кожному випадку проводиться по вираженню (4). З отриманих часових залежностей індукційованої ЕДС визначається середнє значення напруги. Всі характеристики розраховувались при чисто активній навантаженні ($\cos\phi=1$).

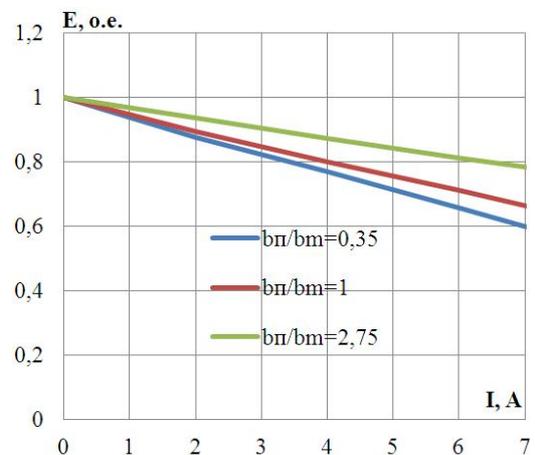


Рисунок 8 – Результат розрахуку зовнішньої характеристики для різних варіантів конструкції

Верхня крива відповідає генератору з максимальної висотою постійних магнітів. Незважаючи на те, що з збільшенням висоти постійних магнітів зростають магнітні потоки розсіювання, зовнішня характеристика отримується більш жорсткою за рахунок того, що зростає МДС постійного магніта і дія розмагнічуючої реакції якоря проявляється в меншій ступені.

Для оцінки величини електромагнітного моменту і його пульсацій для різних конструктив-

ных вариантов исследуемого генератора произведен расчет электромагнитного момента как функции времени $M_{эм}(t)$.

На рис. 9 приведены результаты расчета временной зависимости электромагнитного момента.

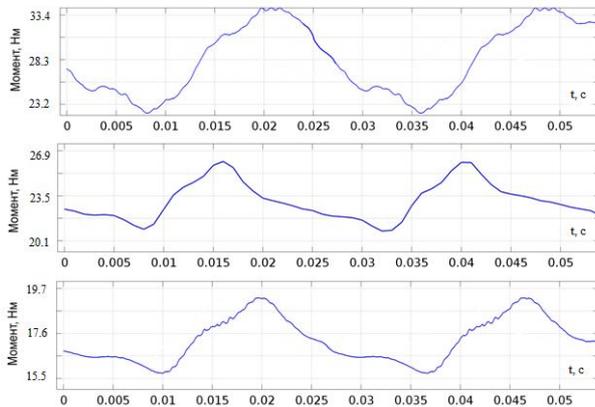


Рисунок 9 – Результат расчета электромагнитного момента

С ростом высоты постоянных магнитов возрастает величина электромагнитного момента, однако возрастает величина пульсаций, что впоследствии негативно сказывается на виброакустических характеристиках и долговечности подшипников. Амплитуда пульсаций составляет $\approx 21, 17, 12\%$ соответственно для конструктивного исполнения генератора с максимальной, средней и минимальной высотой постоянных магнитов. При этом с изменением конфигурации полюсов ротора наблюдается изменение характера пульсаций момента. Это объясняется влиянием потоков рассеивания, конфигурацией зубцово-пазовой зоны, размерами и местом расположения постоянных магнитов, длиной полюсного башмака. Среднее значение рассчитанных электромагнитных моментов составляет 28,3 Нм, 23,5 Нм и 17,6 Нм.

ВЫВОДЫ. Разработана двумерная полевая математическая модель, которая позволяет рассчитывать значения магнитных потоков магнитоэлектрического генератора, внешнюю характеристику и электромагнитный момент. Преимуществом модели является то, что в ней учитывается возвратная кривая постоянных магнитов, модель позволяет разделить магнитные потоки генератора и отличается более низким ($\approx 40\%$) временем расчета одной точки модели.

Анализ результатов расчета позволяет заключить, что с ростом высоты магнита и, соответственно, увеличением объема активных магнитных материалов относительное падение характеристики в диапазоне от 0 до I_n уменьшается на $\approx 37-20\%$.

Исходя из результатов проведенной оптимизации ротора и соответствующего расчета внешней характеристики, следует выбирать максимально возможную, в рамках выбранной конфигурации, высоту магнита, исходя из механической прочности

и скорости вращения. Это позволит получить более жесткую внешнюю характеристику и, следовательно, расширить диапазон нагрузок и повысить устойчивость генератора.

В дальнейшем разработанная модель является основанием для исследования концевых эффектов данного генератора и разработки цепи-полевой математической модели для расчета внешних характеристик при различном характере нагрузки и учете схемотехнических решений, направленных на стабилизацию выходного напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чумак В.В., Пономарев А.И. Синхронный генератор с комбинированным возбуждением // Энергия–XXI век. – 2013. – Вып. 1. – С. 28–34.
2. Васильковский Ю.Н., Гайденок Ю.А., Русятинский А.Е. Моделирование режимов работы тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами // Электротехніка і електромеханіка. – 2013. – Вип. 5. – С. 19–22.
3. Пат. 99684 Україна, МПК Н 02 К 21/14. Синхронний генератор з комбінованим збудженням / М.В. Богаєнко, В.С. Попков, В.В. Чумак; заявник і патентовласник Богаєнко М.В., Попков В.С., Чумак В.В.; заявл. 03.10.11; опубл. 10.09.12, Бюл. № 17.
4. Пономарьов О.І. Повірочний розрахунок моделі магнітоелектричного генератора з магнітним шунтуванням на базі АІР100L4 в режимі навантаження // Технічна електродинаміка. – 2015. – Вип. 3. – С. 49–54.
5. Гребеников В.В., Прыймак М.В. Моделирование магнитных полей в электромеханических преобразователях энергии с постоянными магнитами. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2009. – Вип. 3 (56), част. 2. – С. 70–73.
6. Бахвалов Ю.А., Грекова А.Н. Определение намагниченности постоянного магнита в составе электрической машины на основе решения обратной задачи теории поля // Известия ВУЗов: серия «Электромеханика». – 2012. – Вып. 1. – С. 34–36.
7. Шишкин В.П. Автоматизированное проектирование торцовых магнитоэлектрических генераторов переменного тока. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2006. – 68 с.
8. Монахов Е.А., Чумак В.В. Методика расчета магнитной системы торцевых синхронных магнитоэлектрических генераторов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Вип. 1/2015 (90). – С. 23–26.
9. Chalmers V.J., Spooner E. Anaxial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system // Energy Conversion. IEEE Transactions. – Iss. 14/1999 (2). – PP. 251–257.
10. Howey D.A. Axial flux permanent magnet generators for pico-hydropower // EWBUK Research Conference. – United Kingdom: Electrical Engineering Department, Imperial College, 2009.

**MATHEMATICAL SIMULATION OF GENERATOR WITH COMBINED EXCITATION
FOR AUTONOMOUS ENERGY INSTALLATION**

V. Chumack, M. Kovalenko

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
prosp. Pobedy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: chumack_kpi@ukr.net

O. Ponomarev

Limited Liability Company "VIPSERVISPLUS"
prosp. Povitroflotsky, 72, Kyiv, 03151, Ukraine.

Development of the permanent magnets with high energy and small size encourage the development of independent and active use of highly generators with permanent magnets. Topical application of a contactless generators of this type with the magnetizing coil, which allows the use of a wide range of load to stabilize the operating voltage. The aim of the article is to develop a mathematical model of the field and the optimization of the working area of its rotor. Numerical solution of the problem was carried out in the software package COMSOL Multiphysics. The stator of the test generator is made on the basis of serial asynchronous motor type AIR100L4. The developed model allows to obtain the distribution of the electromagnetic field in the computational domain generator, to assess the quality and value of EDS induced leakage flux generator. The model allows the calculation of the characteristics of the generator when it rotates, all dependent variables are a function of time. With the help of the developed model is made parametric optimization of the working area of the rotor in order to minimize leakage flux of the machine, increasing efficiency and increasing power density. This will improve efficiency and reduce the cost of contactless system bias and stabilize the output voltage of the generator. The study received the electromagnetic field distribution of the total for the two extreme modes: idling and nominal load. The paper proposes a method of separating the field of dispersion of the generator from the main flow and complete. It is possible to determine the optimum ratio between the size of the pole piece and permanent magnets. It is advisable to choose the height of the magnet as much as possible based on design requirements, predetermined mechanical strength and speed magnetolectric generator.

Key words: permanent magnets, permanent-magnet generator, mathematical model, optimization, combined excitation.

REFERENCES

1. Chumak, V.V. and Ponomarev, O.I. (2013), "Synchronous generator with combined excitation", *Energia-XXI century*, no. 1, pp. 28–34. (in Russian)
2. Vaskovsky, Y.N., Gaidenko, Y.A. and Rusyatinsky, A.E. (2013), "Simulation operating modes of traction synchronous motor with permanent magnets", *Elektrotehnika i elektromekhanika*, no. 5, pp. 19–22. (in Russian)
3. Bogaenko, M.V., Popkov, V.S. and Chumak, V.V. (2012), Pat. 99684 Ukraine, IPK H 02 K 21/14. Synchronous generator with combined excitation; applicant and patent owner Bogaenko, M.V., Popkov, V.S. and Chumak V.V.; claim. 03.10.11; publ. 10.09.12, Bull. № 17. (in Ukrainian)
4. Ponomarev, O.I. (2015), "Calibration calculation model of magnetolectric generator with magnetic shunting based on AIN100L4 with rated load", *Technichna elektrodynamika*, no. 3, pp. 49–54. (in Ukrainian)
5. Grebenikov, V.V. and Priymak, M.V. (2009), "Simulation of the magnetic field in electromechanical energy converters with permanent magnets", *Visnik Kremenchutskogo derzhavnogo politechnichnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradskogo*, Vol. 3, no. 56, part 2, pp. 70–73. (in Russian)
6. Bahvalov, Yu.A. and Grekova, A.N. (2012), "Determination of the magnetization of a permanent magnet as a part of the electric machine based on the solution of the inverse problem of the theory of the field", *Izvestiya VUZov: seriya "Elektromekhanika"*, no. 1, pp. 34–36. (in Russian)
7. Shishkin, V.P. (2006), "Automated design of mechanical magnetolectric alternators", *Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina*, 68 p. (in Russian)
8. Monakhov, I. and Chumack, V. (2015), "Method of calculation of the magnetic system of the axial flux permanent magnet", *Visnik Kremenchutskoho natsionalnoho universitetu imeni Mihayla Ostrogradskogo*, Vol. 1, no. 90, pp. 23–26. (in Russian)
9. Chalmers, B.J. and Spooner, E. (1999), "Axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system", *Energy Conversion, IEEE Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 251–257.
10. Howey, D.A. (2009), Axial flux permanent magnet generators for pico-hydropower, *EWBUK Research Conference*, Electrical Engineering Department, Imperial College, United Kingdom.

Стаття надійшла 14.07.2015.