

К.К.Кусаиынов, Т.А.Жакатаев, Б.Р.Нусупбеков, Н.К.Ботпаев

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова
(E-mail: toksanzh@yandex.kz)

К расчету магнитных полей в замкнутых кольцевых контурах ветровых электрогенераторов

Разработана итерационная модель, которая позволяет по наведенной э.д.с. рассчитать численные значения и определить профиль индукции магнитного поля $B(y)$ в воздушном зазоре электрической машины. Авторами установлено, что на основании этого можно рассчитать потоки магнитной индукции Φ вдоль кольцевого контура на статоре. Модель позволяет рассчитать силы механического сцепления магнита (на роторе) с ферромагнитным материалом (на статоре) на основе вычисления ponderomotorных магнитных объемных наведенных сил. Разработана конструкция ветрового генератора с использованием мощных дисковых магнитов на основе сплава неодим-железо-бор.

Ключевые слова: итерационная модель, э.д.с., магнитная индукция, модель, электрогенератор, кольцевой контур.

Мы разработали и спроектировали новую конструкцию электрогенератора с использованием круглых магнитных дисков (в виде небольших цилиндров) на основе неодимового магнита [1, 2] (рис. 1). Постоянные магниты из сплава NdFeB (неодим-железо-бор) обладают большой магнитной индукцией и, соответственно, большой магнитной силой. По времени потеря магнитных свойств неодимовых магнитов составляет 2 % за 5 лет [1, 2].

Электрогенератор предназначен для ветровой установки (ВУ). Используются небольшие по размеру неодимовые магнитные диски (16 штук), модель 30*10, сила удержания 20 кг, вес 54 г [1, 2]. Общая конструкция электрогенератора приведена на рисунке 1.

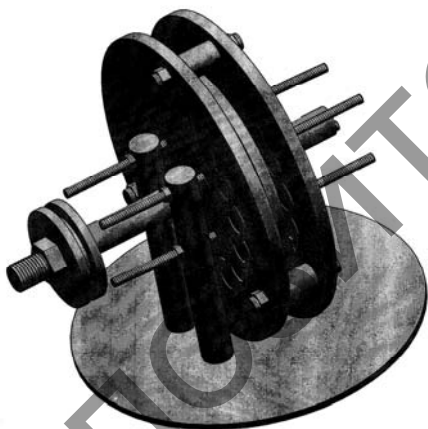


Рисунок 1. Общий вид электрогенератора на постоянных дисковых магнитах

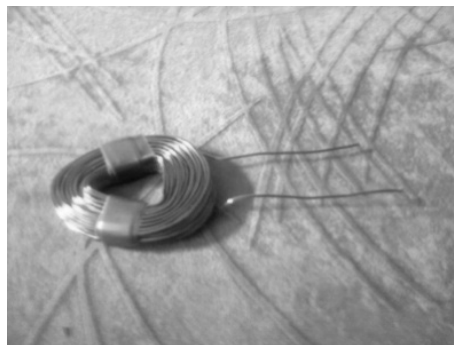


Рисунок 2. Одна катушка из общей катушечной цепи

В данной разработке мы отошли от традиционного подхода, когда на роторе магнитное поле возбуждается на основе токов, протекающих через катушку на вращающемся роторе [3, 4]. Отличие нашего варианта от других, ранее известных [1, 2] в том, что диск с магнитами один и он находится в центре системы. Два диска с катушечными обмотками расположены симметрично с обеих сторон от диска с постоянными магнитами. Диск с магнитами вращается, а два диска с катушками неподвижны и жестко закреплены. Общая конструкция также отличается от других, ранее известных вариантов [1, 2].

В центре располагается диск, на котором установлены 16 постоянных магнитов. С обеих сторон от этого диска имеются два внешних диска, на которых располагаются катушки ($16 \times 2 = 32$) из медного провода. Диаметр медного провода 0,9 мм. По нашим расчетам, данная обмотка может генерировать мощность до 800 Вт, при скорости ветра до 5 м/с.

Нами был проведен эксперимент по изучению влияния значения диаметра кольца провода катушечной обмотки на уровень наводимой э.д.с. Оказалось, что максимальное значение э.д.с. наблюдается при значениях $d \sim (1,1-1,2)d_0$, где d_0 — диаметр диска магнита. При дальнейшем увеличении диаметра катушки d э.д.с. асимптотически снижается. Графическая зависимость представлена на рисунке 3.

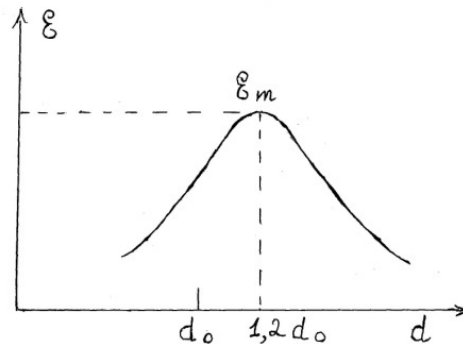


Рисунок 3. Изменение усредненного уровня наведенного э.д.с. в зависимости от диаметра обмотки кольцевой катушки

Для одной из катушек при неинтенсивном перемещении магнита наведенная э.д.с. составила примерно 0,08 В. Хотя первоначально (до эксперимента) интуитивно нам казалось, что максимальная э.д.с. будет индуцироваться при $d = d_0$.

Мы разработали расчетную схему, согласно которой магнитное поле индукции возле торца круглого магнитного диска можно рассчитать в результате решения обратной задачи для уравнения объемной пондеромоторной силы, действующей на ферромагнитный материал [5–9]:

$$f = \frac{1}{2} \frac{\mu_a - \mu_0}{\mu_a \mu_0} \text{grad } B^2, \quad (1)$$

$$\text{grad } B^2 = \frac{\partial B^2}{\partial x} + \frac{\partial B^2}{\partial y} + \frac{\partial B^2}{\partial z}, \quad (2)$$

где $\mu_a = \mu_r \mu_0$ — абсолютная проницаемость стального листа; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха (магнитная постоянная); μ_r — относительная магнитная проницаемость ферромагнитного материала, может иметь значения 200 (твердая сталь), 5000 — полосовое железо [5–9]. Задача решается на ЭВМ численно. Для решения нелинейных итерационных уравнений и уравнений с частными производными мы используем Intel Visual Fortran на основе Visual Studio 2010 и Matlab 2013. Разработали специальный алгоритм, который сохраняет сходимость и устойчивость сеточной расчетной схемы при различных значениях шагов для сеточной области.

Силу магнитного притяжения можно рассчитать также из уравнения для силы, оказываемой на контур с током в магнитном поле с градиентом [5–9]:

$$F = p_m \text{grad } B, \quad (3)$$

где $p_m = IS$ — магнитный момент некоторого эквивалентного контура тока, который в усредненном варианте представляет (заменяет) микротоки в сплошном ферромагнитном материале. Уравнение (3) также численно решается на ЭВМ. Для удобства вычислений мы преобразовали (1) к виду

$$f = \frac{1}{2} \frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \text{grad } B^2. \quad (4)$$

По значению градиента магнитного поля можно приближенно рассчитать силу магнитного притяжения, а также индуцируемую э.д.с. в контуре с катушкой. Из веса, удерживаемого магнитом, находим силу $F = mg$. Тяговую (удерживающую) силу находим в результате интегрирования объемной силы $dF = fdV$.

Одним из существенных плюсов этих ветрогенераторов (ВГ) без ферромагнитного сердечника является отсутствие залипания, так как статор не имеет железных элементов и представляет из себя всего лишь медные катушки, залитые в смоле в виде дисков, между которыми вращается диск

с магнитами. При отсутствии залипания винт генератора стартует гораздо раньше и вырабатывает электроэнергию на более слабом ветру, а генератор, например, из асинхронного двигателя, чаще всего имеет залипание, которое мешает винту сдвинуться, и он попросту стоит, ничего не генерируя, и ждет порыва, чтобы начать крутиться, в то время когда аксиальный генератор вращается и заряжает аккумулятор.

Магниты на диске располагаются с чередованием полюсов. Чем больше магнитных полюсов, тем на более меньших оборотах генератор начинает давать приемлемый для зарядки ток. Но очень большое число магнитов часто трудно эффективно разместить в конструкции, так как размеры катушек становятся очень маленькими из-за ограниченных размеров статоров [1, 2].

Толщину статоров стоит увеличивать, если сила притяжения магнитов выше 12–16 кг каждого по отдельности, а так лучше добиться равной толщины магнитов [1, 2].

Для первого варианта ВГ мы выбрали 16 полюсов. Соединение катушек лучше делать в одну фазу, так как при небольших оборотах напряжение достаточно слабое для зарядки, а катушки, соединённые последовательно, дают больше напряжения в вольтах и, следовательно, зарядка аккумулятора начинается раньше, хотя сила тока слабее, чем при соединении в звезду, но схема «звезда» работает от больших оборотов.

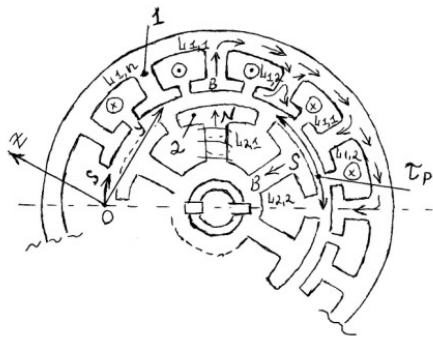
При разработке нами ставились следующие цели: 1) упрощение конструкции, 2) снижение себестоимости, 3) повышение безопасности и надежности. Таким образом, будет создана технологическая база экологически чистых, относительно дешевых и доступных систем отопления и освещения. По расчетам при несильном ветре статорная обмотка может генерировать незначительную э.д.с., порядка 12–24 В. Несоответствие этой э.д.с. уровню 220 В было основным препятствием для широкого внедрения ВГ небольших габаритов. При различном ветре амплитуда и частота генерируемой э.д.с. изменяется. В известных ранее моделях ВГ стабилизация переменных параметров осуществлялась механическими или гидравлическими узлами. Это приводило к невысокому к.п.д. и возрастанию массы и габаритов ВГ.

Мы нашли новое технологическое решение — стабилизация переменных величин будет выполнена на основе силовой полупроводниковой электроники. Преобразование низковольтного напряжения (+,–) 12 В до уровня ~220 В мы планируем осуществить на основе полупроводникового преобразователя (инвертора), который преобразует это постоянное напряжение до переменного — 220 В с частотой 50 Гц. Планируем использовать силовые транзисторные инверторы с ключевым программным управлением.

Предусмотрено использование энергии аккумулятора для освещения помещения низковольтными лампами в случае полного безветрия. Но полное отсутствие ветра (число штилей) не превышает 3 % дней в году. Питание на индукторную цепь будет осуществляться посредством транзисторно-ключевой схемы, когда уровень подаваемого напряжения зависит от уровня выходного э.д.с. от статорной обмотки. Таким образом, мы намерены добиться достаточно надежной стабилизации параметров.

При сильном ветре излишек вырабатываемого напряжения будет подаваться на систему нагрева воды, которая всегда нужна в хозяйственной и бытовой деятельности. Сложный уровень электронной схмотехники у зарубежных генераторов обусловлен тем обстоятельством, что малые расстояния между поселками и городами позволяют объединить их в единую сеть. При объединении в единую сеть возникает необходимость высокого (сложного) уровня электронной схмотехники. У нас такой необходимости нет. Очень большие расстояния между населенными пунктами не позволят объединять их в единую сеть. Поэтому нам нужны конструкции с минимально возможной упрощенной электронной полупроводниковой схмотехникой и упрощенной системой управления. Наряду с освещением домов ВГ могли бы служить для электропитания телевизора, холодильника, телефонной связи, компьютера, интернет-связи. При наличии доступных и относительно дешевых источников электроэнергии количество людей, которые пожелали бы жить и трудиться в сельскохозяйственных и отдаленных регионах страны, будет возрастать. Это привело бы к подъему и развитию экономики страны в целом. Ветровые генераторы будут иметь спрос у населения.

На рисунке 4 показана схема ротора и статора однофазного электрогенератора [3–5].



1, 2 — «зубцы» статора и ротора

Рисунок 4. Схема электрического генератора с электромагнитным ротором

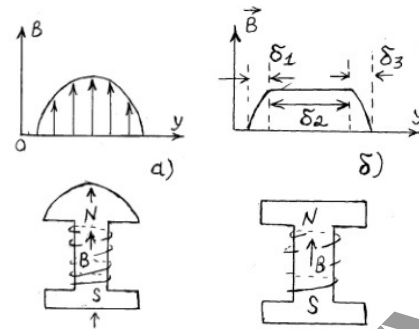


Рисунок 5. Зависимость формы индукции поля $B(y)$ от формы ферромагнитного сердечника

В таких конструкциях электрических машин форма (профиль) наведенного э.д.с. зависит от формы индукции магнитного поля B (рис. 5). Когда форма магнитного наконечника делается со значительным выступом (закруглением), то профиль ε -э.д.с. приближается к гармоническому сигналу (рис. 5а), когда наконечник слабого закругления, форма ε приближается по виду к трапеции. При достаточном количестве витков на зубцах ротора профиль B (соответственно ε) приближается к прямоугольному (рис. 5б).

Непосредственное измерение B связано с определенными техническими трудностями, иногда с отсутствием достаточно точных измерительных приборов. Поэтому мы предлагаем очень удобный и легко реализуемый способ определения магнитной индукции B и магнитного потока Φ по известным значениям (распределениям) наведенного э.д.с. — ε , в силу того, что измерять распределение ε легче и проще.

Изложим суть метода. Значение мгновенного э.д.с. определяется из соотношения [5–9]

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

В общем случае

$$d\Phi = BdF + FdB, \quad (6)$$

где F — площадь поверхности витка, перпендикулярная к \vec{B} . Дифференциал dB отличен от нуля в областях δ_1 и δ_3 (рис. 5б). В области δ_2 $B = \text{const}$.

Из (5) и (6) получим

$$\frac{dB}{ds} + \frac{L}{F} B = \frac{\varepsilon}{v_s F}, \quad (7)$$

где v_s — линейная окружная скорость; L — активная длина проводника; $ds = v_s dt$ — дифференциал дуги s вдоль кольцевого контура ВГ. В формуле (7) знак минус отсутствует, так как мы рассматриваем абсолютные изменения искомых величин. Чтобы упростить выкладки, примем, что в пределах полюсного деления τ_p длина дуги s_p мало отличается от значения прямолинейной координаты y . Тогда можем записать приближенное равенство

$$\frac{dB}{ds} = \frac{dB}{rd\varphi} \approx \frac{dB}{dy}. \quad (8)$$

Выберем постоянный шаг h вдоль y , $h = \tau_p / N$, $y_{i+1} = y_i + h$.

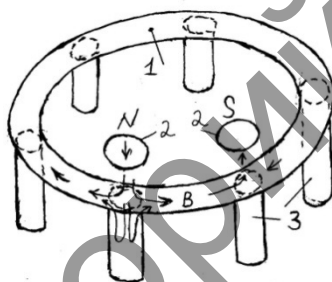
Профиль $\varepsilon = \varepsilon(y)$ можно зафиксировать на осциллограмме или на самопишущем приборе. Зная масштабы, определяем набор дискретных значений ε_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $n = N + 1$, соответствующих различным y_i . Запишем (7) в виде разностного уравнения по схеме Эйлера с правой частью в двух точках с уточнением:

$$B_{i+1}^{(k+1)} = B_i^{(k)} = \gamma[\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}], \quad (9)$$

где $\gamma = \frac{h}{2} \frac{1}{v_s F}$, $k = 1, 2, 3, \dots$, — индекс итерации.

Уравнение (9) легко вычисляется итерационным способом при определенно заданных граничных условиях. Когда электрическая машина имеет чередующиеся магнитные полюса, краевые (граничные) условия будут нулевыми: $B_1 = 0$, $B_n = 0$. В более общем случае данная задача разрешима и при ненулевых граничных условиях. Для этого в уравнении (9) используется итерация по индексу k . Вначале неизвестное значение $B_1 \neq 0$ искусственно приравняем к нулю. После первой прогонки в правой части получим некоторое значение $B_n \neq 0$. При следующих прогоночных расчетах уже будет $B_1 \neq 0$. Итерационные расчеты тем и хороши, что позволяют уточнять значения вычисляемых величин при расчете по циклам. В программе задается предел точности для итерации μ , и итерационные вычисления проводятся до значений $B_{i+1}^{(k+1)} - B_{i+1}^{(k)} \leq \mu$.

Для увеличения к.п.д. ветрового генератора мы предлагаем внутри каждой катушки установить металлические цилиндрические (сплошные, не полые, по высоте катушечной обмотки) трубочки из металла с высоким ферромагнитным показателем. Чтобы не происходило прилипания магнитного диска к этим стержням (так называемое залипание во время остановки воздушного винта), необходимо все эти цилиндрические трубочки по верхним торцевым частям соединить со сплошным кольцеобразным диском в виде полосового контура (рис. 6) с небольшим поперечным размером полосы.



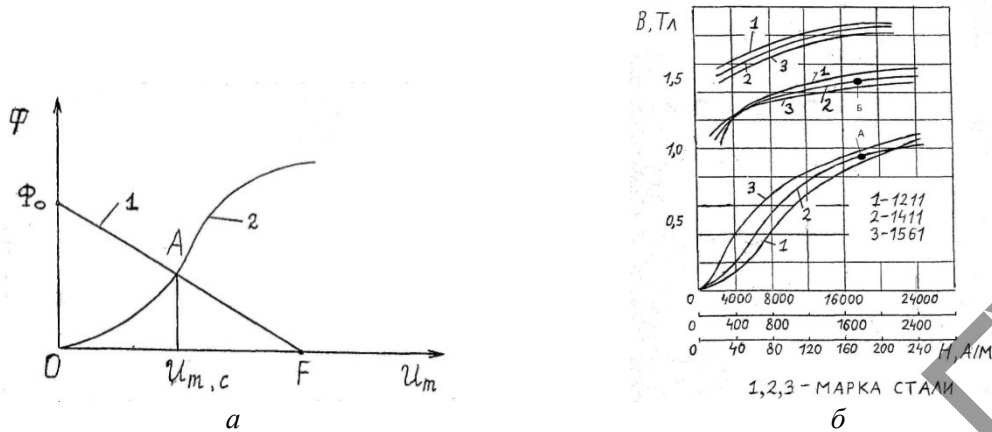
1 — полосовой сплошной лист металла — ферромагнитная «шайба»;
2 — постоянные магниты; 3 — сплошные металлические цилиндры — ферромагнитные стержни

Рисунок 6. Металлическая шайба с трубками

Отсюда видно, что магнитные потоки $\Phi = B \cdot S$, исходящие от магнитного диска, будут перераспределяться в сплошном замкнутом круговом контуре. В итоге магнитная «тяговая» сила равномерно распределится по круговому контуру $2\pi R$, и не будет происходить залипания магнита в отдельных местах расположения катушек статора.

При рассмотрении решения прямой и обратной задачи расчета магнитных цепей в классическом варианте [3–5], во-первых, процедура вычислений и действий по формулам, построение таблицы $\Phi = \Phi(U_{mc}^{(k)} F = p_m \text{grad } BF = p_m \text{grad } B)$ являются очень трудоемким и утомительным процессом для «ручного» счета и применение современных микрокалькуляторов не облегчает существенно дело. Во-вторых, отсутствует алгоритм, по которому можно было бы выбирать именно те значения $B^{(k)}$, которые обеспечивали бы хорошее начальное приближение.

Поэтому мы предлагаем новый способ (алгоритм) решения второй, т.е. обратной задачи, когда по заданной м.д.с. необходимо определить магнитное поле B_n . По сути, это комбинация прямой и обратной задачи, основанная на приведении всех расчетных уравнений к решению системы нелинейных алгебраических уравнений методом последовательных итераций. Преимущество данного метода в том, что она легко программируется и вычисляется на ПЭВМ. Кроме этого, в данном новом алгоритме имеется процедура, на основе которой легко определяется начальное приближение Φ_n , в результате позволяющие находить наиболее близкие к точке A (рис. 7) значения магнитного поля и потока индукции.



a — магнитные потоки в нелинейном контуре и воздушном зазоре [3–5];
б — кривая намагничивания стали [3–5]

Рисунок 7

Таким образом, мы предлагаем оптимальный вариант решения обратной задачи. Теперь излагаем конкретный алгоритм решения задачи.

1. задается м. д. с. $U_m = I \cdot w$.

2. Определяем начальное приближение Φ_H по формуле $\Phi_H = \frac{U_m}{R_{om} + R_m}$, где $R_m = \frac{L_c}{\mu_0 S_c}$ — маг-

нитное сопротивление всего ферромагнитного участка; $S_c = \frac{\sum L_j \cdot S_j}{\sum L_j}$ — среднее взвешенное по раз-

личным участкам значение поперечной площади всего нелинейного участка. Принимаем, что $\Phi_k = \Phi_H$, μ равно среднему арифметическому значению на отрезке $O-F$ на рисунке 7а.

3. По данному значению Φ_k вычисляем соответствующие значения (пока еще приближенные к истине) $B_j^k = \frac{\Phi_k}{S_j}$ для каждого j -го участка. Для каждого B_j^k определяем соответствующее ему H_j^k .

В случае применения компьютера табличные значения B_j^k и H_j^k заносятся в программу и далее используется интерполяция Лагранжа, которая успешно применена во всех других наших задачах для расчета теплообмена тел при переменных граничных условиях.

4. Вычисляем намагничивающие силы на различных звеньях: $U_{mj}^k = H_j^k \cdot L_j$.

5. Для всех звеньев нелинейного участка находим суммарную намагничивающую силу U_{mc}^k :

$$U_{mc}^k = \sum U_{mj}^k$$

6. Вычисляется $\Phi_2 = \Phi_2(U_{mc}^k)$; $\Phi_2 = \Phi_k = B_j^k \cdot S_j$.

7. Определяем $\Phi_1 = \frac{I \cdot w}{R_{om}} - \frac{U_{mc}^k}{R_{om}}$.

8. Сравниваются значения двух магнитных потоков $\Phi_1 = \Phi_1(U_{mc}^k)$ и $\Phi_2 = \Phi_2(U_{mc}^k)$. Для этого вычисляется разность $\varphi_1 = \Phi_1 - \Phi_2$.

9. Если $\varphi_1 < 0$, то значение $\Phi_2 = \Phi_k$ уменьшается, если же $\varphi_1 > 0$, то значение $\Phi_2 = \Phi_k$ увеличивается. Данное изменение первичного значения Φ_2 в компьютерной программе задается по циклу, следовательно, осуществляется с фиксированным дискретным интервалом, шагом $\Phi_2 = \Phi_k \pm \frac{\varphi_1}{2}$.

При каждом повторении цикла шаг $\frac{\Phi_1}{2}$ изменяется, т.е. изменение функции происходит с переменным (уточняющимся) шагом.

10. Переходим к пункту 3.

Вычисленные значения H_j^k проверяются по формуле [3–5]

$$H_1L_1 + H_2L_2 + H_0L_0 + H_3L_3 + \dots = I \cdot w = U_m. \quad (10)$$

Отметим, что здесь и заключен смысл объединения первой и второй, т.е. прямой и обратной задач. Формула (10) из первой задачи служит для переуточнения данных H_j^k , рассчитываемых во второй задаче.

11. Вычисляется абсолютное значение $\varphi_2 = \text{abs}(\varphi_1)$. При достижении условия $\varphi_2 = \varepsilon \rightarrow 0$, программа останавливается. Предел точности можно выбрать из интервала $\varepsilon = 0,001 \div 0,0001$.

12. Выдача результатов.

На самом деле, магнитная цепь, приведенная на рисунках 4, 6 будет разветвленной. Мы рассмотрели магнитные потоки только в одном замкнутом контуре, т.е. только в одной ячейке полного кругового контура по 2π . Но следует отметить, что, несмотря на растекание магнитного потока влево и вправо от этой конкретно рассмотренной нами ячейки, эта убыль потока будет компенсироваться притоком магнитных потоков от следующих двух пар (всего из шести) зубцов ротора. Таким образом, задача свелась к рассмотренному нами случаю одной ячейки. Но даже если магнитные потоки были бы несимметричными и если бы нам пришлось суммировать магнитные потоки по различным узлам, применяя законы Кирхгофа, то все равно данная задача несложным образом редуцируется (приводится) к рассмотренному нами и изложенному выше алгоритму (пункты 1–12). Просто увеличивается количество циклов итерации, в зависимости от количества самостоятельно и отдельно действующих ячеек, т.е. контуров. Это не вызывает трудностей при решении задачи с применением компьютерных технологий.

Но более интересным, по мнению авторов, является следующий момент. По формуле (5) вычисляется э.д.с. Применяя различные редукторы, которые могут увеличивать число оборотов винта лопасти при небольших значениях скорости ветра, можно достичь большого значения количества оборотов n_1 . То есть необходимый уровень э.д.с. так или иначе достигается. Мощность ВГ определяется не только уровнем э.д.с. Мощность прямо пропорциональна току, протекаемому по обмоткам. В результате происходит нагрев обмоток статора, ротора и всего корпуса ВГ. Таким образом, в конечном счете, мощность ВГ определяется не количеством витков, содержащихся на обмотках ротора и статора, а законами нагревания и скоростью остывания обмоток и всего корпуса в целом. И здесь авторы рекомендуют использовать методы расчета теплообмена тел конечных (произвольных) размеров, изложенные в [10].

Выводы

1. Разработана итерационная модель, которая позволяет по наведенной э.д.с. рассчитать численные значения и определить профиль индукции магнитного поля $B(y)$ в воздушном зазоре электрической машины. На основании этого можно рассчитать потоки магнитной индукции Φ вдоль кольцевого контура на статоре.

2. Разработана модель для расчета силы механического сцепления магнита (на роторе) с ферромагнитным материалом (на статоре) на основе вычисления пондеромоторных магнитных наведенных сил.

Список литературы

- 1 <http://svoy-vetrogenerator.ru>
- 2 <http://soliaris2010.narod.ru>
- 3 *Евсюков А.А.* Электротехника. — М.: Просвещение, 1979. — 248 с.
- 4 *Токарев Б.Ф.* Электрические машины. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 389 с.
- 5 *Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.* Основы теории цепей. — М.: Энергоиздат, 1989. — 528 с.
- 6 *Матвеев А.Н.* Электричество и магнетизм. — М.: Высш. шк., 1983. — 463 с.
- 7 *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. — М.: Наука, 1976. — 616 с.

- 8 Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество. — М.: Наука, 1982. — 335 с.
- 9 Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество. — М.: Наука, 1977. — 687 с.
- 10 Жақатаев Т.А., Нургужин М.Р., Какимова К.Ш. К расчету теплообмена тел произвольных форм при переменных граничных условиях // Вестн. Караганд. ун-та. Сер. естеств. наук. — 2001. — № 1(21). — С. 80–88.

Қ.Қ.Құсайынов, Т.А.Жақатаев, Б.Р.Нүсіпбеков, Н.К.Ботпаев

Жел генераторының дөңгелек контурында магнит өрісін есептеу

Өндірілген э.қ.к. негізінде электр машинаның ауалы қуысында магнит өрісінің индукциясын және $B(y)$ таралуын есептеуге итерациялық модель ұсынылды. Сол бойынша магнит өрісінің Φ ағыны есептелді. Модель ротордағы магнит және статордағы ферромагниттік сақина арасындағы жанасқан механикалық күшті есептеуге арналды. Есептеулер көлемдік пондеромоторлы күштерді ескерді. Темір–неодим–бор қоспадан жасалған қуатты дискілі магниттер негізінде жел генераторының тиімді жобасы құрастырылды.

K.K.Kussaiynov, T.A.Zhakatayev, B.R.Nusupbekov, N.K.Botpayev

To calculation of magnetic fields in the closed ring contours of wind electric generators

The iterative model which allows on induced electro driving force (e.d.f.) is developed. Of an induction of a magnetic field can to calculate numerical values and to define a profile $B(y)$ in in air gap of the electric car. On the basis of it is possible to calculate streams of a magnetic induction F along a ring contour on a stator. The model allows to calculate forces of mechanical coupling of a magnet (on a rotor) with a ferromagnetic material (on a stator) on the basis of calculation of ponderomotive magnetic volume induced forces. The design of the wind generator on the basis of use powerful disk magnets on the basis of an alloy iron–neodymium–boron is developed.

References

- 1 <http://svoy-vetrogenerator.ru>
- 2 <http://soliaris2010.narod.ru>
- 3 Evsyukov A.A. *Electrical equipment*, Moscow: Prosvescheniye, 1979, 248 p.
- 4 Tokarev B.F. *Electric machines*, Moscow: Energoatomizdat, 1989, 389 p.
- 5 Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strahov S.V. *Fundamentals of circuit theory*, Moscow: Energoizdat, 1989, 528 p.
- 6 Matveyev A.N. *Electricity and magnetism*, Moscow: Vysshaya shkola, 1983, 463 p.
- 7 Tamm I.E. *Bases of the theory of electricity*, Moscow: Nauka, 1976, 616 p.
- 8 Savel'yev I.V. *Course of the general physics*, Vol. 2, Electricity, Moscow: Nauka, 1982, 335 p.
- 9 Sivukhin D.V. *General course of physics*, Vol. 3. Electricity, Moscow: Nauka, 1977, 687 p.
- 10 Zhakatayev T.A., Nurguzhin M.R., Kakimova K.Sh. *Bulletin of Karaganda University, Nat. sciences ser.*, 2001, 1(21), 80–88.