

Экспериментальное определение характеристик синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ), входящего в состав модели автономной ветроэлектроустановки горизонтально-осевого типа с системой стабилизации частоты вращения и вывода ротора из-под ветра.

Ключевые слова: синхронный генератор, постоянные магниты, поток, эксперимент, характеристики, автономная ветроэлектроустановка, горизонтально-осевой тип.

Введение. Широкое распространение синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ) обусловлено достоинствами магнитоэлектрической схемы построения, для которой характерны отсутствие затрат энергии на возбуждение магнитного потока, отсутствие щеточно-коллекторного узла и связанных с ним потерь, а также повышенная габаритная мощность, надежность и долговечность.

Постановка задачи. На сегодняшний день полностью отсутствует серийный выпуск синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов, которые могли бы войти в состав ветроэлектроустановок (ВЭУ), предназначенных для автономного энергоснабжения потребителя. Возникает необходимость в разработке конструкции СГПМ, которая удовлетворяла бы требованиям, предъявляемым к автономным ВЭУ малой мощности.

Экспериментальные характеристики. Действующая модель гондолы трехлопастной ветроэлектроустановки с ротором горизонтально-осевого типа, закрепленным на валу синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Гондола действующей модели ветроэлектроустановки
Генератор представляет собой многополюсную трехфазную синхронную машину с магнитной системой ротора «звездочка» с явно выраженными полюсами (полюсные башмаки отсутствуют). Конструкция сборного ротора содержит намаг-

ниченные в радиальном направлении постоянные магниты, прикрепленные к втулке, установленной на валу генератора. Вид полюса генератора в разрезе представлен на рис. 2. Для создания магнитного потока применены высококоэрцитивные магниты из сплава неодим-железо-бор [1, 2].

Как известно, электромагнитная мощность синхронной машины определяется выражением [1, 2]:

$$P_{эм} = U \frac{E_0}{x_d} \sin \theta + \frac{U^2 (x_d - x_q)}{2 x_d x_q} \sin \theta, \quad (1)$$

где θ – угол внутреннего сдвига между ЭДС холостого хода и напряжением;

x_d – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси;

x_q – синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси.

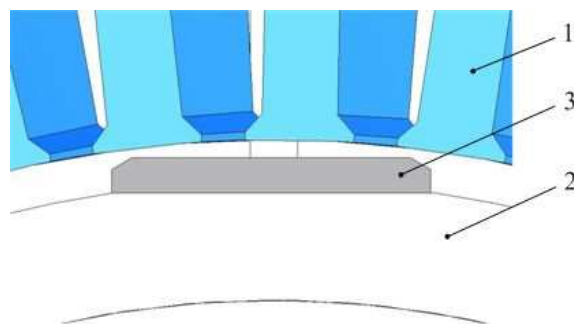


Рис. 2. Полюс генератора в разрезе:
1 – сердечник статора; 2 – втулка ротора; 3 – магнит

В рассматриваемой синхронной машине с постоянными магнитами $x_q > x_d$, поэтому вторая составляющая мощности $P_{эм}$ в выражении (1) изменяет знак на обратный, становясь отрицательной, по сравнению с синхронными машинами, имеющими электромагнитное возбуждение. Это приводит к тому, что при заданной мощности СГПМ работает при большем значении θ , чем машина с электромагнитным возбуждением.

На рис. 3 представлены экспериментальная частотная характеристика холостого хода СГПМ, представляющая собой зависимость напряжения генератора от частоты вращения ротора, и нагрузочная характеристика генератора (активное сопротивление нагрузки).

Уравнение регрессии нагрузочной характеристики СГПМ имеет вид [4]:

$$y = 0,043x^2 - 0,606x + 2,403. \quad (2)$$

Внешние характеристики электрических машин с постоянными магнитами отличаются от подобных характеристик генераторов с электромагнитным возбуждением тем, что они рассматриваются не при постоянстве МДС возбуждения, а при определенном положении прямой возврата на рабочей диаграмме магнита. Каждой точке на внешней характеристике соответствует своя рабочая точка на прямой возврата, свои значения магнитного потока и МДС возбуждения.

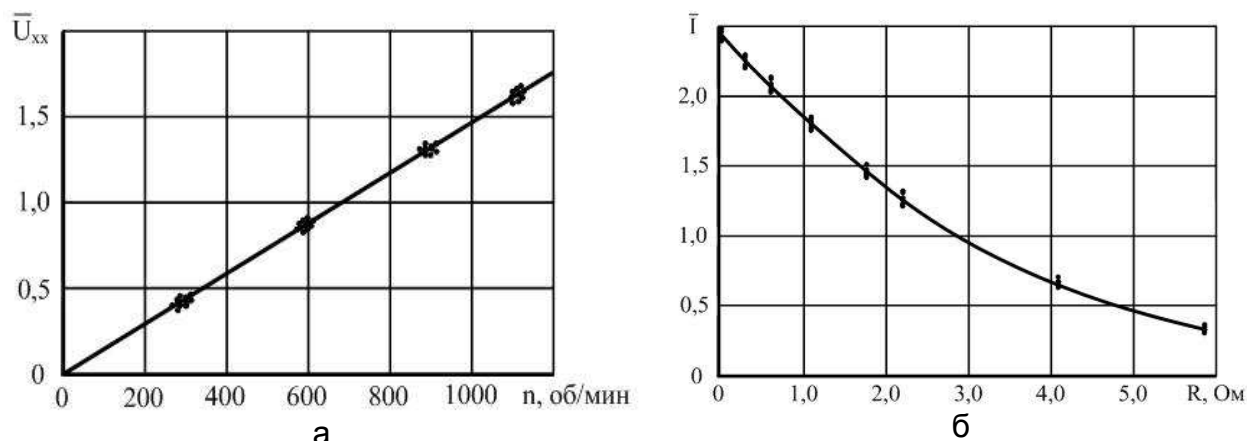


Рис. 3. Экспериментальные характеристики генератора:
а – частотная характеристика; б – нагрузочная характеристика

Вид внешних характеристик СГПМ зависит от характера нагрузки, параметров магнитной цепи и обмотки якоря, численных значений синхронных индуктивных сопротивлений по продольной x_d и поперечной x_q осям, а также соотношения между ними. При $x_q > x_d$ аналитические выражения для внешних характеристик имеют следующий вид [2, 3]:

$$E_0 = U \cos(\psi - \varphi) + I r_a \cos \psi + I x_d \sin \psi, \quad (3)$$

где

$$\sin \psi = \frac{I x_q + U \sin \varphi}{\sqrt{(I x_q + U \sin \varphi)^2 + (U \cos \varphi + I r_a)^2}}, \quad \cos \psi = \frac{U \cos \varphi + I r_a}{\sqrt{(I x_q + U \sin \varphi)^2 + (U \cos \varphi + I r_a)^2}}.$$

Ниже приведены экспериментальные характеристики генератора в относительных единицах (величины отнесены к номинальным значениям напряжения, тока, мощности и момента), которые были получены при работе машины на активную нагрузку ($\cos \theta = 1$). Экспериментальная внешняя характеристика и зависимость мощности генератора от тока нагрузки для номинальной частоты вращения представлены на рис. 4. Уравнение регрессии представленной внешней характеристики имеет вид:

$$y = -0,231x^2 + 0,01x + 1,303. \quad (4)$$

Уравнение регрессии зависимости мощности машины от тока нагрузки:

$$y = -0,424x^3 + 0,64x^2 + 0,913x - 0,002. \quad (5)$$

Уравнение регрессии моментной характеристики имеет вид:

$$y = 0,804x^3 - 1,239x^2 + 1,424x - 0,0001. \quad (6)$$

Уравнение регрессии характеристики коэффициента полезного действия:

$$y = -3,506x^4 + 11,07x^3 - 12,32x^2 + 5,572x + 0,009. \quad (7)$$

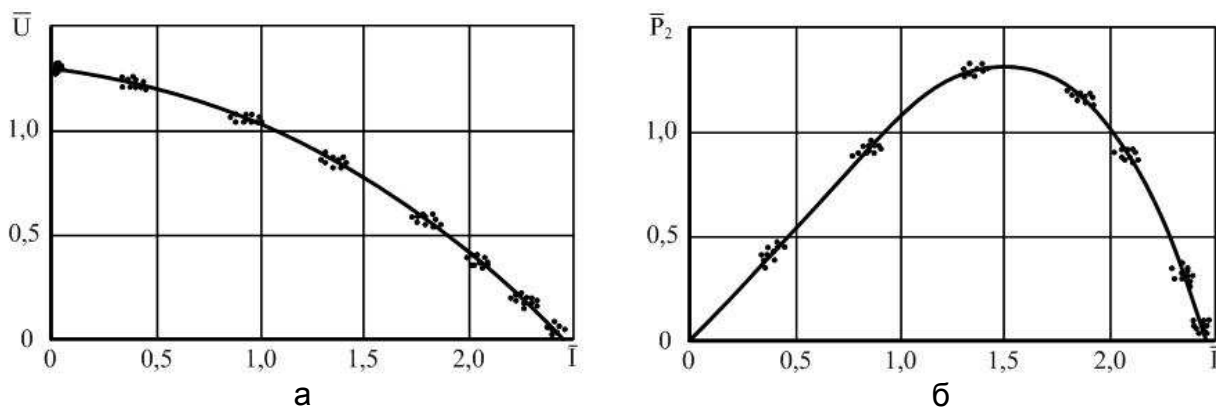


Рис. 4. Экспериментальные характеристики генератора:
а – внешняя характеристика; б – характеристика мощности

Экспериментальная моментная характеристика генератора и зависимость КПД генератора от мощности представлены на рис. 5. Сравнение экспериментальных и теоретических характеристик СГПМ представлены на рис. 6 и 7.

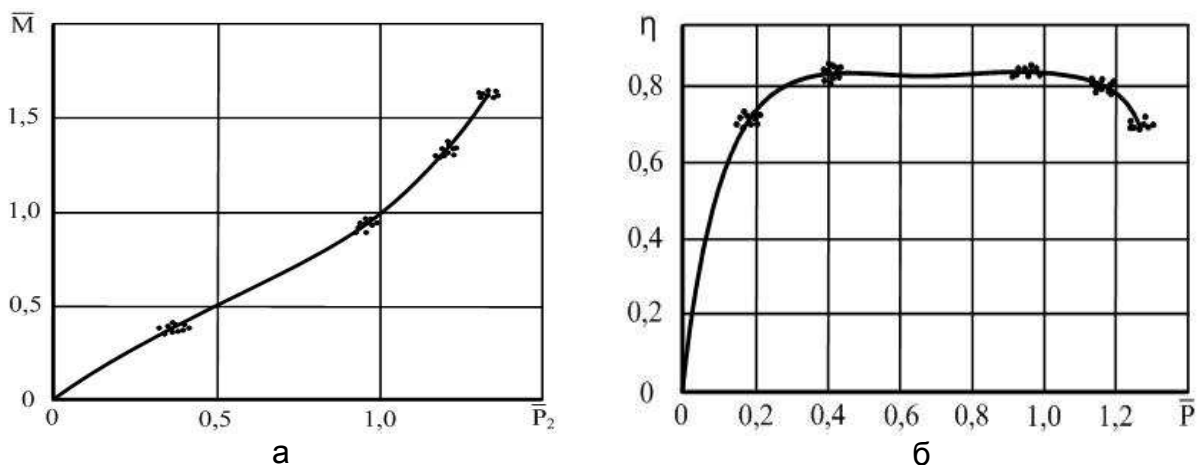


Рис. 5. Экспериментальные характеристики генератора:
а – моментная характеристика; б – зависимость КПД от мощности

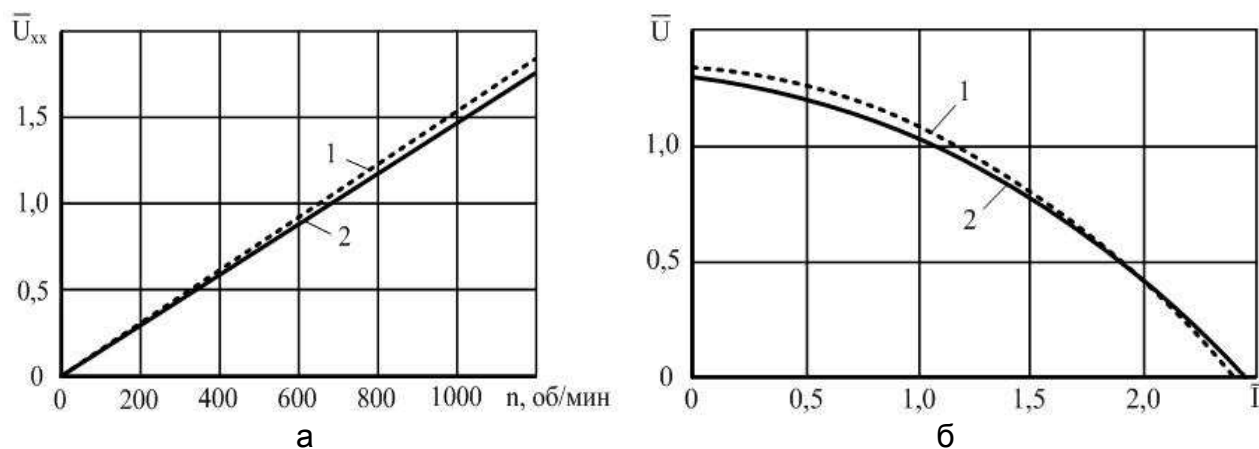


Рис. 6. Частотная (а) и внешняя (б) характеристики генератора:
1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

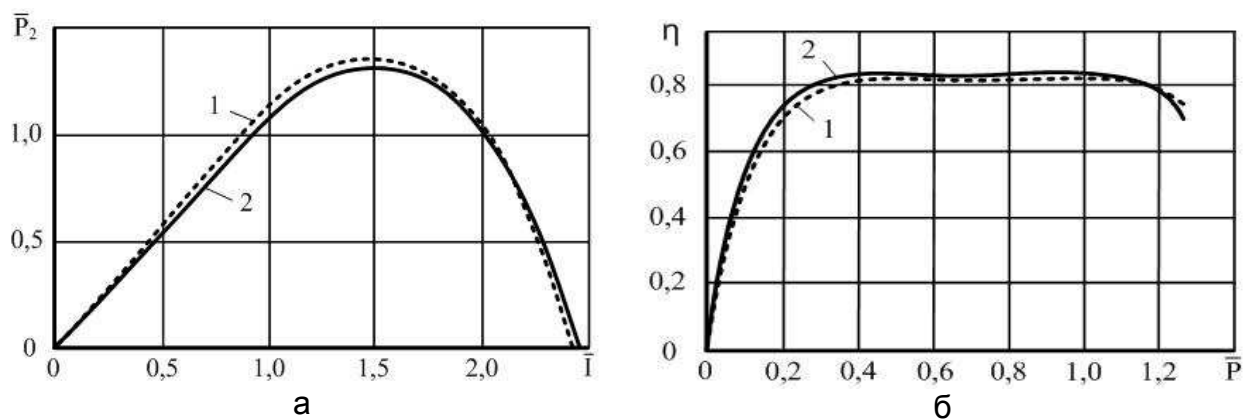


Рис. 7. Характеристика мощности (а) и характеристики КПД (б) генератора:
1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

Как видно из рисунков, теоретические и экспериментальные характеристики СГПМ имеют сходный характер. В результате исследований установлено, что различия между теоретическими и экспериментальными кривыми для номинальной частоты вращения ротора генератора составляют 3% – 6%.

Выводы

Применение высококоэрцитивных магнитов на базе редкоземельных элементов позволило улучшить массово-габаритные характеристики СГПМ (вследствие установки на втулку ротора тонких магнитов и отсутствия демпферной клетки, защищающей магнит от размагничивания, снижены масса ротора и его момент инерции относительно оси вращения). Исключение из конструкции ротора полюсных башмаков и бандажей позволило значительно снизить стоимость изготовления индуктора. Для уменьшения момента сопротивления генератора и исключения эффекта залипания ротора, конструкция сердечника статора выполнена со скосом пазов. Перечисленные мероприятия позволили снизить скорость ветра запуска ВЭУ и улучшить условия работы ветротурбины, что особенно актуально для ВЭУ, роторы которых жестко закреплены на валах генераторов.

Список литературы

1. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.. Ветроэлектрогенераторы: Учебник. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2003. – 400 с.
2. Балагуров В. А. Электрические машины с постоянными магнитами. / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев; - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 220 с.
3. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. – М.: Высшая школа, 1990. – 250 с.
4. Губин С.В., Яковлев А.И. Теория планирования экспериментов в энергетике – Курс лекций для высших технических учебных заведений. – Киев, Миллениум, 2009 – 180 с.

Рецензент: к.т.н., доц. зав. каф. С. В. Губин Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.

Поступила в редакцию 22.03.10

Експериментальне визначення характеристик синхронного генератора зі збудженням від постійних магнітів

Подано результати експериментальних досліджень характеристик синхронного генератора зі збудженням від постійних магнітів (СГПМ), що входить до складу моделі автономної вітроелектроустановки горизонтально-осьового типу з системою стабілізації частоти обертання і виведення ротора з-під вітру.

Ключові слова: синхронний генератор, постійні магніти, потік, експеримент, характеристики, автономна вітрова електроустановка, горизонтально-осьовий тип

Experimental determination of synchronous generator characteristics with actuation from constant magnets

The results of experimental research on the characteristics of a synchronous generator with permanent magnet excitation (SGPM), a component of an autonomous model wind plant horizontal-axis type with the system to stabilize the frequency of rotation of the rotor and the output from the wind.

Keywords: synchronous generator, constant magnets, current, experiment, characteristics, autonomous wind-electric plant, horizontal-axial type