

УДК 621.313

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Ю.А. Макаричев, Ю.В. Зубков, А.С. Ануфриев, В.П. Певчев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Математическая модель синхронного генератора ветроэнергетической установки предназначена для оптимизационного расчета его параметров и характеристик. Объектом моделирования служит синхронный генератор малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов. Применена конструкция индуктора со встроенными постоянными редкоземельными магнитами и насыщающимися магнитостиками. Основой расчета служит численное моделирование магнитного поля машины методом конечных элементов. Магнитное поле моделируется отдельно для режимов холостого хода, реакции якоря и нагрузочного. Для расчета рабочего режима используется диаграмма Blondеля. Продольная и поперечная реакции якоря моделировались численными методами. Полученные результаты позволили выбрать оптимальную геометрию индуктора.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, синхронный генератор, постоянные встроенные магниты, метод конечных элементов.

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) в последнее время во многих странах вносят значительную долю в общее производство электрической энергии. По данным Renewables 2015 Global Status Report, на 2015 год в Дании с помощью ветрогенераторов производится 42 % всего электричества; в Португалии – 27 %; в Испании – 20 %; в Германии – 8 %; в ЕС – 7,5 % [1]. В России этот показатель составляет 4,8 %. Единичная мощность агрегатов морского и наземного базирования достигает 4,5–5 МВт. Турбины класса 1,5–2,5 МВт, по данным Renewable Energy World, занимают 82 % в мировой ветроэнергетике [2]. Такие установки не только решают проблему производства экологически чистой возобновляемой энергии, но и успешно конкурируют с традиционными методами генерирования электроэнергии. Стоимость 1 кВт·часа электроэнергии мощных ВЭУ приближается к стоимости электроэнергии, производимой на тепловых электростанциях [3]. Однако ВЭУ малой мощности по цене производимой электроэнергии с учетом капитальных затрат, эксплуатационных и амортизационных расходов существенно уступают традиционным энергосистемам, если речь идет о районах с развитой структурой энергосетей. Но существует немало объектов электропотребления небольшой мощности, для которых нерентабельно строить линии электропередач. Это могут быть отдаленные сельскохозяйственные объекты сезонного использования, туристические кемпинги, заповедники и т. п. Их потреб-

Юрий Александрович Макаричев (д.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Юрий Валентинович Зубков (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Андрей Сергеевич Ануфриев, аспирант.

Владимир Павлович Певчев (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Теоретические основы электротехники».

ляемая мощность часто не превышает нескольких киловатт. Современная автономная система электроснабжения, состоящая из ветрогенератора, солнечной батареи и буферной аккумуляторной батареи, позволяет решить эту проблему экологически чистыми методами.

Особенностью работы синхронного генератора с постоянными магнитами, который чаще всего применяется для таких систем, является то, что он должен обеспечивать требуемое количество и качество электроэнергии при широком диапазоне изменения ветровой нагрузки. При изменении силы ветра в степенной зависимости изменяется механическая мощность на валу ветроколеса. Это накладывает ряд ограничений, которые должны учитываться при расчете и проектировании генератора.

В качестве объекта исследования был выбран генератор номинальной мощностью 8 кВт, приводимый во вращение ветроколесом карусельного типа – так называемым ротором Дарье. Установки такого типа имеют вертикальную ось вращения. Вал ветроколеса соединен непосредственно с валом генератора. Лопасти ветроколеса расположены вертикально и имеют профиль самолетного крыла. Число лопастей может изменяться в зависимости от мощности от двух до 6–8. К достоинствам такой конструктивной схемы следует отнести отсутствие механизма ориентации по направлению ветра (ротор Дарье работает независимо от направления ветра), отсутствие трансмиссии, механическую устойчивость и несклонность к «разносу» при усилении ветра сверх критического значения. На рис. 1 приведены зависимости частоты вращения n ротора и механической мощности на валу P от скорости ветра ВЭУ БРИД 350.

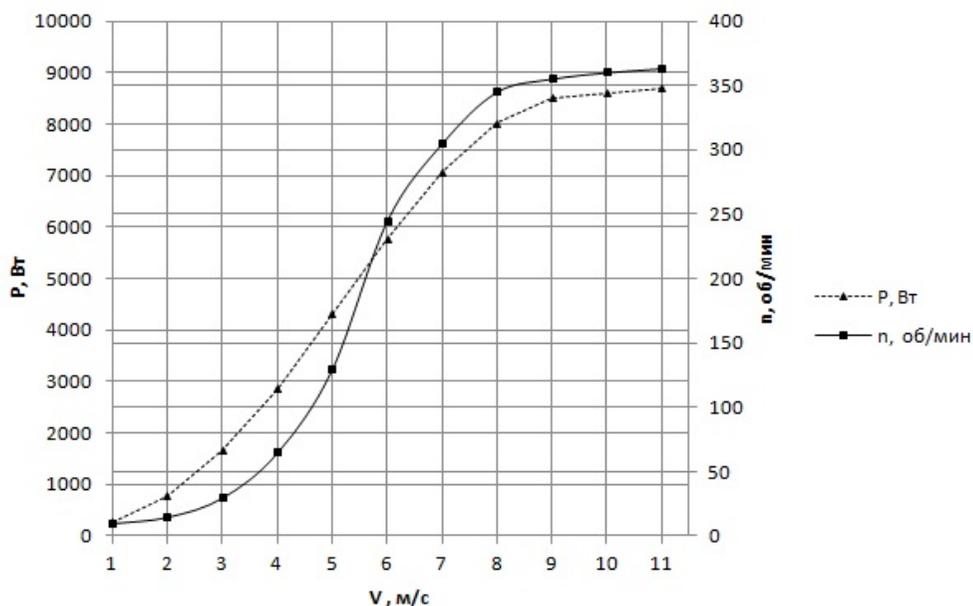


Рис. 1. Характеристики мобильной ВЭУ БРИД 350

Из графиков видно, что при достижении скорости ветра значений 9–10 м/с частота вращения ротора практически перестает расти. Аналогична и зависимость отдаваемой мощности. При меньших скоростях характеристики квадратичные.

При выбранной конструктивной схеме и типе ротора ВЭУ на ротор генера-

тора передаются значительные вибрационные нагрузки от ветроколеса. Поэтому к его механической прочности предъявляются повышенные требования. В первую очередь это относится к способу крепления постоянных магнитов. Неодимовые магниты не отличаются высокой механической прочностью и термической стойкостью. Поэтому радикальным решением проблемы их крепления является применение ротора с встроенными магнитами. В такой конструкции магниты вставляются в соответствующие пазы в шихтованном магнитопроводе ротора (рис. 2).

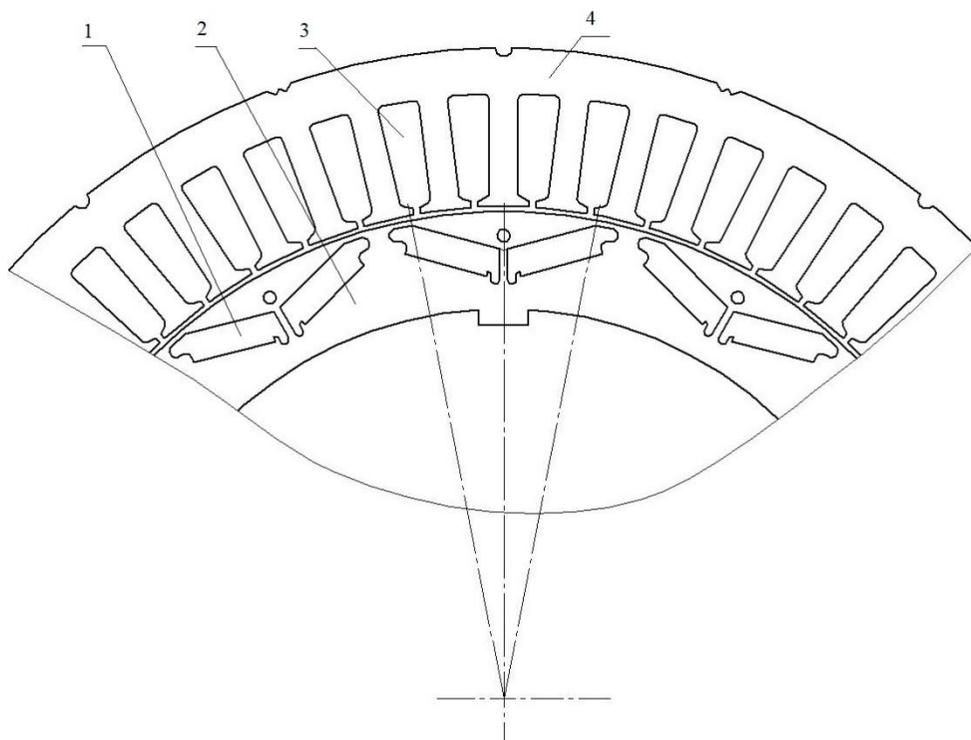


Рис. 2. Фрагмент магнитной системы:

1 – постоянный магнит; 2 – магнитопровод ротора; 3 – паз статора; 4 – магнитопровод статора

Главная сложность при расчете магнитной системы, представленной на рис. 2, заключается в выборе размеров насыщающихся мостиков и их геометрии. Если не решить эту задачу корректно, то магнитная система будет вообще неработоспособной из-за короткого замыкания магнитов – потоки рассеяния будут больше полезного потока в зазоре. Для решения этой задачи необходимо воспользоваться методами численного моделирования магнитного поля.

С целью определения рабочей точки магнита на кривой размагничивания при известной геометрии активной зоны СГ методом конечных элементов осуществлен расчет магнитного поля, включающий несколько этапов, первым из которых был расчет поля в режиме холостого хода.

Холостой ход генератора

Решение данной задачи позволило определить индукцию B_δ и магнитный поток Φ_δ в воздушном зазоре (амплитудные значения и гармонический состав). Кроме этого, по картине магнитного поля при холостом ходе определены коэф-

коэффициенты рассеяния постоянных магнитов k_{σ} и насыщения магнитной цепи $k_{\mu 0}$.

Моделирование проводилось в программном комплексе *ELCUT* [4] в постановке магнитостатической задачи с общепринятыми допущениями. Картина поля, полученная в ходе решения, показана на рис. 3.

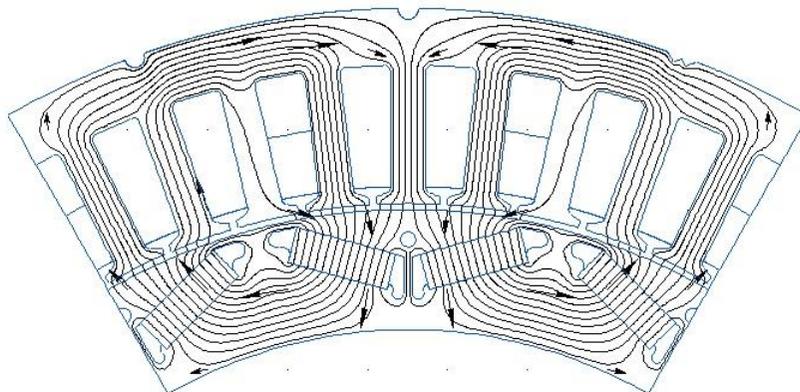
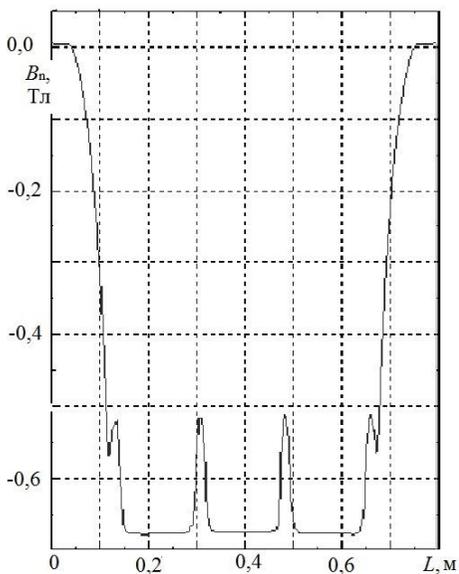
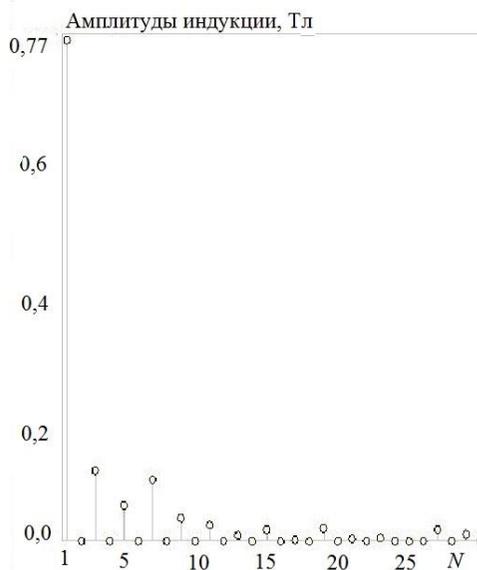


Рис. 3. Силовые линии магнитной индукции (холостой ход)

Основную информацию о поле в воздушном зазоре несет нормальная составляющая магнитной индукции. Именно она создает ЭДС обмотки статора. Кривая распределения нормальной составляющей магнитной индукции на середине воздушного зазора и ее спектральный анализ показаны на рис. 4.



a



б

Рис. 4. Нормальная составляющая индукции в зазоре:
a – кривая индукции; *б* – гармонический состав (*N* – номер гармоники)

Из анализа гармонического состава следует, что кроме первой гармоники поля в кривой индукции присутствуют нечетные гармоники с номерами 3, 5, 7, 9, 11, 15, 19 и выше. Их амплитуды составляют от 12 до 3 % от амплитуды первой гармоники, уменьшаясь с ростом порядкового номера.

Основные параметры поля, полученные в результате численного моделирования магнитного поля машины на холостом ходу, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры поля на холостом ходу

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Магнитный поток в нейтральном сечении магнита	Φ_m	0,00834	Вб
Магнитный поток в воздушном зазоре	$\Phi_{\delta 0}$	0,00623	Вб
Коэффициент рассеяния магнитов	k_{σ}	1,338	–
Максимальное значение магнитной индукции в зазоре	$B_{\delta m 0}$	0,679	Тл
Первая гармоническая индукции в зазоре	$B_{\delta m 0 1}$	0,77	Тл
Первая гармоника магнитного потока в зазоре	$\Phi_{\delta 0 1}$	0,00621	Вб
Коэффициент насыщения магнитной цепи	k_{μ}	1,048	–

Второй задачей, которую было необходимо решить для получения рабочей точки магнита, является учет размагничивающего действия реакции якоря.

Реакция якоря

Традиционно задача учета реакции якоря в синхронных машинах решается методом двух реакций, когда единый поток, созданный током якоря, разделяется на два ортогональных: поперечный и продольный потоки реакции якоря. Для этих составляющих поля статора определяются соответствующие значения индуктивных сопротивлений.

Из картины поля при совпадении магнитных осей индуктора и обмотки якоря (продольная ось d совпадает с осью фазы $A-X$) определено ненасыщенное синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси x_{ad} . При моделировании ток в фазе A равен максимальному относительному значению $I_A = I_m = 1$, токи в фазах B и C $I_B = I_C = 0,5$.

Из картины поля при совпадении поперечной оси ротора и оси обмотки статора (поперечная ось q совпадает с осью фазы $A-X$) определено ненасыщенное синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси x_{aq} . При моделировании ток в фазе A , как и в первом случае, равен максимальному относительному значению $I_A = I_m = 1$, токи в фазах B и C $I_B = I_C = 0,5$. На рис. 5 представлены кривые нормальной составляющей магнитной индукции продольной (а) и поперечной (б) реакции якоря на середине воздушного зазора.

Результаты моделирования и их гармонический анализ позволили определить параметры реакции якоря, приведенные в табл. 2.

Численное моделирование магнитного поля реакции якоря позволило более точно по сравнению с инженерными методиками рассчитать значения коэффициентов формы поля по поперечной и продольной осям машины. Это стало возможным в результате гармонического анализа кривых индукции реакции якоря в зазоре. Классические аналитические методы дают недопустимые погрешности

для рассматриваемой конструкции магнитопровода ротора, в которой постоянные магниты шунтируются магнитомягкой сталью.

Таблица 2

Параметры поля реакции якоря

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Магнитный поток продольной реакции якоря	Φ_{ad}	0,00246	Вб
Коэффициент формы поля продольной реакции якоря	k_{ad}	0,713	–
Максимальное значение магнитной индукции в зазоре от продольной реакции якоря	B_{adm}	0,45	Тл
Первая гармоническая индукции в зазоре от продольной реакции якоря	B_{adm1}	0,321	Тл
Первая гармоника магнитного потока продольной реакции	Φ_{ad1}	0,00275	Вб
ЭДС продольной реакции якоря	E_{ad}	111,6	В
Ненасыщенное индуктивное сопротивление продольной реакции якоря	x_{ad}	8,75	Ом
Магнитный поток поперечной реакции якоря	Φ_{aq}	0,00486	Вб
Коэффициент формы поля поперечной реакции якоря	k_{aq}	0,903	–
Максимальное значение магнитной индукции в зазоре от поперечной реакции якоря	B_{aqm}	0,667	Тл
Первая гармоническая индукции в зазоре от поперечной реакции якоря	B_{aqm1}	0,602	Тл
Первая гармоника магнитного потока поперечной реакции	Φ_{aq1}	0,00485	Вб
ЭДС поперечной реакции якоря	E_{aq}	208,3	В
Ненасыщенное индуктивное сопротивление поперечной реакции якоря	x_{aq}	16,3	Ом

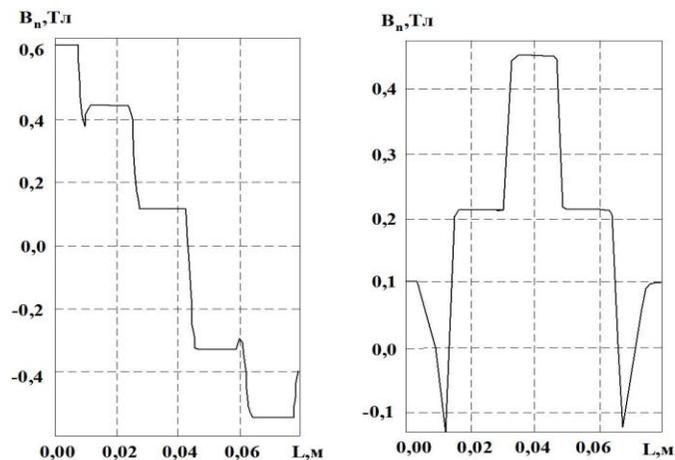


Рис. 5. Кривые индукции в зазоре от реакции якоря:
а – продольная; б – поперечная

В результате моделирования выявлено, что соотношение индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям не такое, как в традиционных явнополюсных синхронных генераторах: для рассматриваемого генератора $x_{ad} < x_{aq}$. Это качественное отличие исследуемого генератора необходимо учитывать в расчете нагрузочного режима посредством диаграммы Blondеля.

Работа под нагрузкой

Для моделирования рабочего режима генератора необходимо в первую очередь определить значение угла между векторами тока и ЭДС холостого хода ψ . Для этого рассчитываем ненасыщенные значения индуктивного сопротивления по поперечной оси

$$x_{qn}^* = x_{aqn}^* + x_{\sigma}^*, \text{ о.е.},$$

где x_{σ}^* – индуктивное сопротивление рассеяния, полученное по результатам моделирования поля.

Из векторной диаграммы Blondеля [4]

$$\sin \psi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\cos \varphi + r_a^*}{\sin \varphi + x_{qn}^*} \right]^2}} = 0,834,$$

здесь $\cos \varphi = 0,95$ – коэффициент мощности генератора, работающего на выпрямитель;

$\psi = 56,5$ электрических градусов – угол между векторами тока якоря и ЭДС холостого хода.

Задача моделирования магнитного поля в номинальном нагрузочном режиме решалась при сдвиге осей поля возбуждения (ось d) и оси фазы A – X обмотки якоря на угол $56,5$ электрических градусов.

На рис. 6 показана картина магнитного поля для момента времени, когда ток в фазе A максимальный.

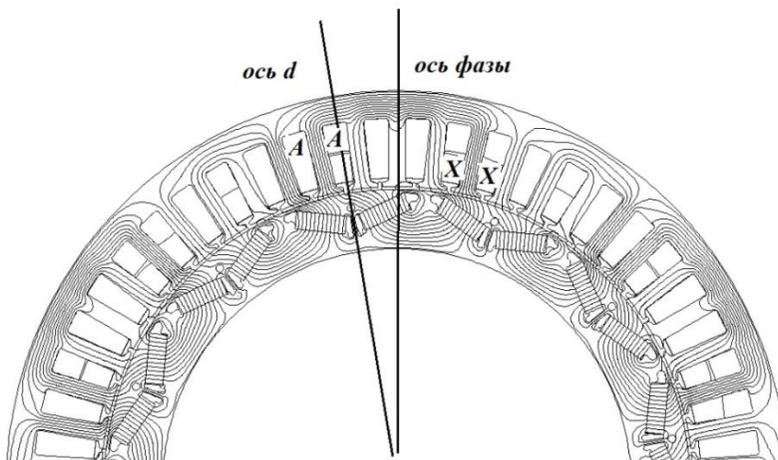


Рис. 6. Магнитное поле машины под нагрузкой

Результатом решения полевой задачи стало определение интегральных параметров генератора, значения которых приведены в табл. 3.

Параметры синхронного генератора

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Магнитный поток в воздушном зазоре	Φ_{δ}	0,00632	Вб
Индукция в магните на нейтральной линии	B_m	0,95	Тл
Напряженность поля в магните	H_m	616000	А/м
Амплитуда первой гармоники поля в зазоре	$B_{\delta m1}$	0,74	Тл
Магнитный поток в воздушном зазоре	Φ_{δ}	0,00632	Вб
Первая гармоника потока	$\Phi_{\delta 1}$	0,00598	Вб
ЭДС обмотки якоря	E_{δ}	257	В
Напряжение	U	226	В

Для исключения отличия напряжения от номинального значения на 6 вольт, получившегося в ходе расчета, следует скорректировать значение угла Ψ и повторить моделирование.

Результатом проведенных исследований стал совместный проект малой ВЭУ кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования Самарского государственного технического университета и НПО «Шторм». Полевые испытания установки подтвердили обеспечение проектной мощности агрегата 8 кВт при силе ветра 8,5 м/с и более.

Выводы

1. Конструкция ротора синхронного генератора со встроенными магнитами (EmbeddedPMSG) обеспечивает необходимую механическую прочность ротора и требуемое значение магнитного потока в воздушном зазоре.
2. Аналитические методы расчета магнитной цепи генератора с возбуждением от встроенных постоянных магнитов не дают требуемой точности расчета интегральных параметров (коэффициентов рассеяния и насыщения, индуктивных сопротивлений реакции якоря и т. д.). Для получения адекватных результатов необходимо применять численные методы моделирования магнитного поля совместно с анализом векторных диаграмм. Процесс получения результата с заданной точностью – интерактивный.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf
2. <http://www.manbw.ru/analytcs/wind-stations.html>
3. Соломин Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ-Вертикаль // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 10–15.
4. Копылов И.П., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин: 3-е изд. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.
5. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

Статья поступила в редакцию 2 июня 2017 г.

MATHEMATICAL MODEL OF SYNCHRONOUS GENERATOR FOR SMALL WIND POWER PLANT

Yu.A. Makarichev, Yu.V. Zubkov, A.S. Anufriev, V.P. Pevchev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The mathematical model of the wind power plant synchronous generator is intended for the optimal design of its parameters and performance. The simulation object is a low-power synchronous generator with excitation from permanent magnets. The design of an inductor with embedded rare-earth permanent magnets and saturation bridges is used. The basis of the calculation is the numerical simulation of the machine's magnetic field by the finite element method. The magnetic field is modeled separately for no-load, armature reaction and load. The Blondel diagram is used to calculate the operating mode. The longitudinal and transverse armature reactions were modeled by numerical methods. The results obtained allowed us to choose the optimal design of the inductor.

Keywords: *wind power plant, synchronous generator, embedded permanent magnets, finite element method.*

*Yuri A. Makarichev (D. (Techn.)), Professor.
Yuri V. Zubkov (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.
Andrei S. Anufriev, Postgraduate student.
Vladimir P. Pevchev (D. (Techn.)), Professor.*