

УДК 621.313.84

Расчет характеристик торцевого магнитоэлектрического генератора на основе совместного моделирования электромагнитных, тепловых и аэродинамических полей

Д.С. Корнилов, Ю.Б. Казаков
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время отсутствуют математические модели, достоверно описывающие распределение трехмерных электромагнитных, тепловых и аэродинамических полей в торцевых генераторах с постоянными магнитами, а также оценки взаимного влияния данных полей друг на друга. Не исследовано взаимное влияние режимов работы генератора и условий его охлаждения.

Материалы и методы: Взаимосвязанное моделирование электромагнитных, тепловых и аэродинамических полей проведено с использованием методов конечных элементов и конечных объемов на современной многопроцессорной вычислительной технике.

Результаты: Проведено взаимосвязанное моделирование физических полей в активных, конструктивных элементах, внутреннем объеме и окружающем пространстве торцевых генераторов с постоянными магнитами. Проведена оценка снижения эффективности работы торцевых генераторов с постоянными магнитами из-за ухудшения свойств постоянных магнитов вследствие нагрева. Приведены результаты исследований по согласованию мощности, отдаваемой ветроколесом, электрической мощности генератора и мощности отводимых от генератора потерь.

Выводы: Полученные результаты могут быть использованы при проектировании ветроустановок и торцевых генераторов с постоянными магнитами для них. Неучет взаимного влияния физических полей может привести к погрешностям при расчете характеристик генератора.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, торцевой генератор, кольцевая обмотка якоря, постоянные магниты, комплексное моделирование физических полей.

Axial-flux permanent-magnet generator performance computation based on complex simulation of electromagnetic, thermal and aerodynamic fields

D.S. Kornilov, Yu.B. Kazakov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Abstract

Background: Currently there are no mathematical models which can reliably describe the distribution of three-dimensional electromagnetic, thermal and aerodynamic fields in axial-flux permanent-magnet (AFPM) generators, nor is it possible to evaluate the mutual influence of these fields on each other. Mutual influence of operating modes and cooling conditions of the generator has not been investigated either.

Materials and methods: The interconnected simulation of electromagnetic, thermal and aerodynamic fields is carried out by using the methods of final elements and final volumes on modern multiprocessor computer facilities.

Results: Complex modeling of physical fields in active, constructive elements, internal volume and surrounding space of AFPM generator has been carried out. We evaluated the decrease in overall performance of the AFPM generator due to deterioration of properties of permanent magnets under heating. We also conducted a research into coordination of windwheel power, electric power of the generator and the power of losses taken away from the generator.

Conclusions: The obtained results can be used in the design of wind turbines and AFPM generators for them. Not taking into account the mutual influence of physical fields can lead to errors in calculating the generator characteristics.

Key words: wind-power station, axial-flux generator, toroidal armature winding, permanent magnets, complex modeling of physical fields.

Торцевые генераторы с постоянными магнитами (ТПГМ) нашли применение в тихоходных безредукторных ветроустановках малой мощности. Основными их преимуществами являются отсутствие скользящего контакта, простота, надежность, высокая эффективность

работы при малой частоте вращения, лучшие условия охлаждения [1].

Особенность торцевых генераторов – трехмерный характер распределения электромагнитного поля, точный расчет которого возможен только с применением современных средств численного моделирования [2]. При

этом необходимы достоверные данные о распределении температур в объеме машины. Это важно при использовании высококоэрцитивных магнитов NdFeB, поскольку их остаточная намагниченность и коэрцитивная сила существенно снижаются с увеличением температуры. При ослаблении магнитного потока возбуждения из-за нагрева постоянных магнитов (ПМ) уменьшаются потери в стали, что также должно быть учтено. Точная информация о распределении температур позволяет определить локальные перегревы, которые возникают по причине неравенства скоростей охлаждающего воздуха на внешнем и внутреннем диаметре обмоток внутри машины [3]. Эти перегревы могут привести к сокращению срока службы и повреждению изоляции.

Таким образом, при электромагнитном расчете необходим учет распределения температур по объему постоянных магнитов и обмоток. В свою очередь, температуры активных и конструктивных частей генератора зависят от потерь в стали и электрических потерь в обмотках, т. е. от результатов электромагнитного расчета.

Данная задача решается итерационно, путем последовательного пересчета распределения переменного электромагнитного поля в объеме машины и сопряженного конвективного теплообмена с двусторонним обменом тепловыми нагрузками и распределением температурных полей соответственно (рис. 1).

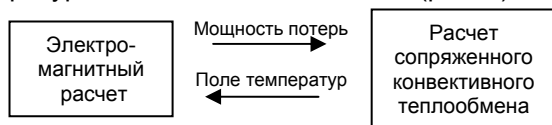


Рис. 1. Схема расчета

Поскольку постоянные времени для тепловых процессов значительно больше, чем для электромагнитных, для сокращения времени расчета при анализе установившихся режимов тепловые нагрузки в электромагнитном расчете усредняются по времени и затем передаются в задачу расчета тепловых и аэродинамических полей. Затем поле распределения температур возвращается в электромагнитный расчет для корректировки сопротивлений обмоток и магнитных свойств постоянных магнитов. Число итераций для достижения удовлетворительной точности совместного расчета составляет 4–5. В результате расчетов было установлено, что неучет нагрева обмоток и постоянных магнитов приводит к погрешности при определении номинальной мощности генератора, достигающей в отдельных случаях 17 %.

Моделирование сопряженного конвективного теплообмена проводилось двумя способами. В первом случае модель представляет собой два полюсных деления машины и область воздуха вокруг нее. Во втором случае модель включает в себя весь генератор, закрепленные на нем лопасти ветроколеса и фрагмент мачты. Сравнение результатов расчетов показало, что и лопасти и мачта являются радиаторами и достаточно интенсивно отводят тепло от активных частей генератора. Таким образом, при использовании в качестве модели периодической части генератора участие в теплоотводе несущей мачты и лопастей следует учитывать поправочными коэффициентами либо проводить дополнительный проверочный тепловой расчет всей установки в сборе.

Применение стабилизации частоты вращения и регулирования возбуждением генерируемого напряжения для обеспечения требуемых параметров выдаваемой электроэнергии не позволяет использовать энергию порывов ветра и снижает максимальную мощность ветроустановки. Поэтому в ветроустановках малой мощности широко используются нерегулируемые генераторы на постоянных магнитах, работающие на переменной частоте вращения (рис. 2). Частота напряжения в данном случае не критична, поскольку генератор работает на управляемый (или неуправляемый) выпрямитель. Стабилизация выпрямленного напряжения осуществляется посредством DC-DC преобразователя, имеющего при небольшой стоимости высокий КПД на большом диапазоне рабочих токов. Данная схема позволяет наиболее эффективно использовать энергию ветра, в том числе и энергию порывов ветра. Поскольку энергия ветрового потока пропорциональна кубу скорости ветра, то даже кратковременные порывы ветра несут значительную энергию, которую следует использовать.

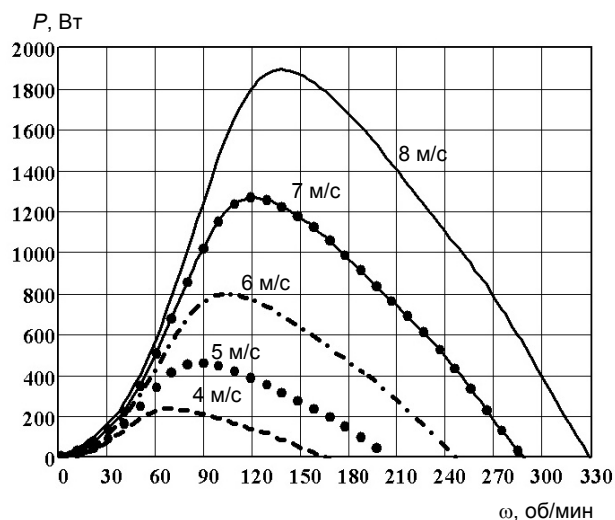


Рис. 2. Зависимость мощности на валу генератора от частоты вращения при различных скоростях ветра

Возможны работы с кратковременными перегрузками, величину и продолжительность которых необходимо учитывать при проектировании генераторов. Совместное моделирование переменного электромагнитного поля и сопряженного теплообмена позволяет определить величину и продолжительность допустимых токовых перегрузок, которые не приведут к размагничиванию постоянных магнитов и повреждению изоляции обмотки.

Порядок моделирования для расчета допустимых перегрузок следующий. Сначала генератор рассчитывается при постоянных скорости ветра, частоте вращения и номинальной токовой нагрузке. Затем скорость ветра увеличивается на некоторую величину (0,5–3 м/с), при этом скорость вращения остается неизменной, а возросший вращающий момент от ветроколеса компенсируется соответствующим увеличением нагрузки в цепи якоря генератора. Определяется отрезок времени, за который обмотка (или постоянные магниты) нагреется до допустимой температуры. Для исследуемого генератора значения допустимых перегрузок по току при частоте вращения $\omega = 150$ об/мин и скорости ветра $v = 8$ м/с представлены в таблице.

Значения кратковременных перегрузок и их продолжительность

Токовая нагрузка, %	120	140	160	180
Допустимая продолжительность перегрузки, с	320	180	90	60

Далее генератор должен быть разгружен до номинальной мощности или ниже при соответствующем увеличении частоты вращения.

Особенность режима эксплуатации рассматриваемого генератора – работа при переменной скорости вращения и переменной на-

грузке (рис. 3). При этом скорость ветра, вращающего ветроколесо и одновременно обдувающего генератор снаружи, также будет изменяться, что будет приводить к изменению теплового состояния генератора. Важной задачей при проектировании генератора и программировании контроллера заряда является определение максимально допустимой нагрузки на генератор в зависимости от частоты вращения и скорости ветра. Непосредственное определение скорости ветра с помощью датчиков недостаточно надежно, приводит к усложнению конструкции и снижению надежности работы. Скорость ветра может быть определена косвенно по текущим значениям тока и напряжения на генераторе, частоте напряжения генератора и известной аэродинамической характеристике ветроколеса (рис. 4) [4]. Таким образом, в ходе моделирования проектируемого ветрогенератора рассчитывается зависимость максимальной отдаваемой генератором мощности от частоты вращения и скорости ветра, ограниченная тремя факторами: максимальной температурой обмотки, максимальной температурой постоянных магнитов и максимальным моментом, развиваемым ветроколесом при соответствующей скорости ветра.

Включение в модель, объединяющую в себе электромагнитный, тепловой и аэродинамический расчеты, параметров и характеристик приводного ветродвигателя позволяет моделировать работу ветроагрегата в целом.

В этом случае в ходе электромагнитного расчета вращающий момент на валу генератора задается не константой, а является функцией частоты вращения и скорости ветра. Расчет производится в следующей последовательности: для фиксированной скорости ветра рассчитывается аэродинамическая характеристика ветроколеса $M = f(\omega)$ (рис. 4); затем рассчи-

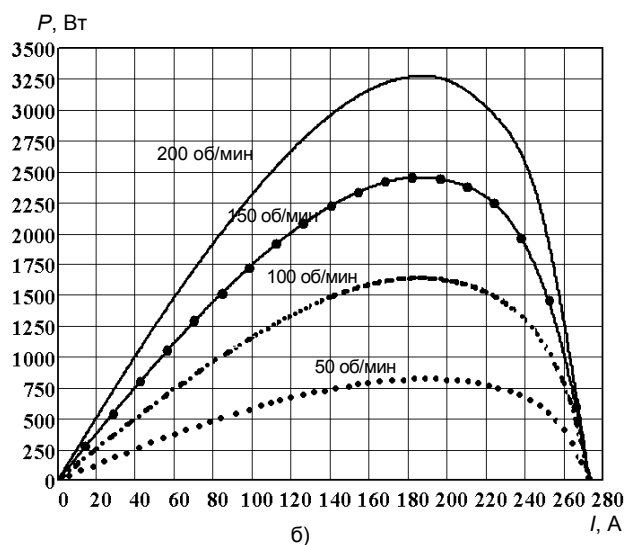
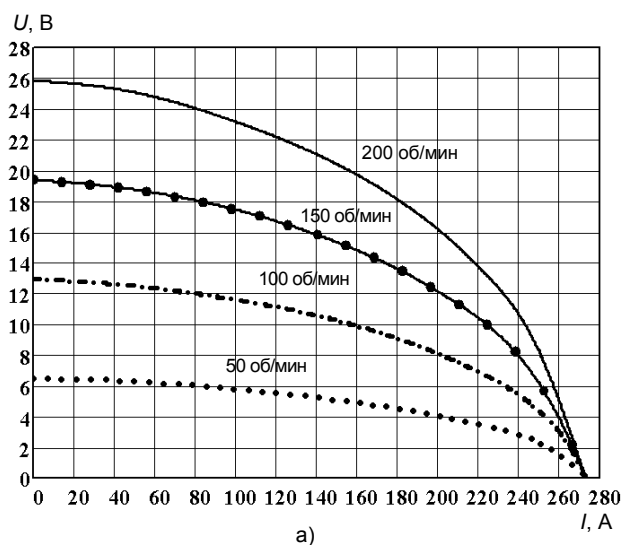


Рис. 3. Внешние характеристики генератора (а) при различных частотах вращения и соответствующие им зависимости полезной мощности генератора от тока нагрузки (б)

тывается режим последовательного нагружения, т. е. ряд рабочих точек от синхронной частоты вращения ветроколеса до скорости, соответствующей максимальному развиваемому ветроколесом моменту. Расчет каждой точки включает в себя взаимосвязанное моделирование электромагнитного, теплового и аэродинамического полей. Далее процедура повторяется для других скоростей ветра. Полученные результаты наиболее точно описывают процессы, происходящие в ветрогенераторе.

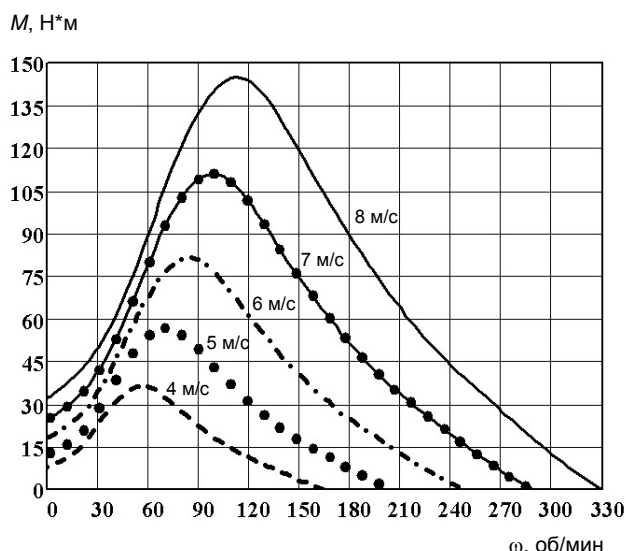


Рис. 4. Аэродинамические характеристики трехлопастного ветроколеса радиусом $R = 2$ м при различных скоростях ветра

При проектировании магнитоэлектрических генераторов стремятся получить пологие скоростные нагрузочные характеристики, чтобы напряжение на нагрузке при колебаниях частоты вращения менялось незначительно [5]. При этом ухудшается использование активных материалов, поскольку токи нагрузки приходится выбирать близкими к токам КЗ. В исследуемом генераторе скоростные нагрузочные характеристики более крутые и имеют практически линейный вид, что говорит о рациональном использовании материалов (рис. 5). Значительные изменения напряжения устраняются стабилизатором напряжения.

Заключение

В результате взаимосвязанного моделирования электромагнитных, тепловых и аэродинамических полей в ТГПМ определена величина снижения полезной мощности генератора вследствие нагрева постоянных магнитов и обмотки. Проведены исследования по согласованию мощности, отдаваемой ветроколесом, электрической мощности генератора и мощности отводимых от генератора потерь. Рассчи-

таны внешние и скоростные нагрузочные характеристики генератора.

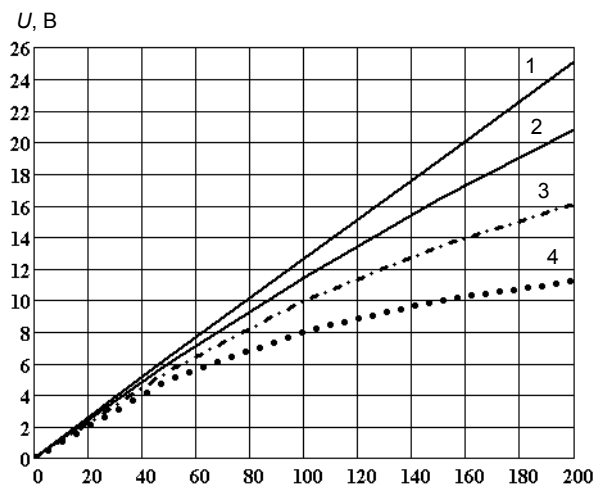


Рис. 5. Скоростные нагрузочные характеристики ТГПМ при различных сопротивлениях нагрузки: 1 – 0,01 Ом; 2 – 0,001 Ом; 3 – 0,0004 Ом; 4 – 0,0002 Ом

Список литературы

1. Паластин Л.М. Синхронные машины автономных источников питания. – М.: Энергия, 1980. – 384 с.
2. Корнилов Д.С., Казаков Ю.Б., Шишкин В.П. Моделирование магнитного поля и совершенствование конструкции магнитной системы торцевого генератора с постоянными магнитами // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 2. – С. 29–32.
3. Казаков Ю.Б., Шишкин В.П., Корнилов Д.С. Разработка математических моделей для расчета температурных полей в ветрогенераторе торцевой конструкции // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 3. – С. 23–26.
4. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
5. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

References

1. Palastin, L.M. *Sinkhronnye mashiny avtonomnykh istochnikov pitaniya* [Synchronous machines of independent supply sources]. Moscow, Energiya, 1980. 384 p.
2. Kornilov, D.S., Kazakov, Yu.B., Shishkin, V.P. *Modelirovanie magnitnogo polya i sovershenstvovanie konstruktsii magnitnoy sistemy tortseвого генератора s postoyannymi magnitami* [Magnetic field simulation and design improvement of axial-flux permanent-magnet generator magnetic system]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 2, pp. 29–32.
3. Kazakov, Yu.B., Shishkin, V.P., Kornilov, D.S. *Razrabotka matematicheskikh modeley dlya rascheta temperaturnykh poley v vetrogeneratore tortsevoy konstruktsii* [Development of mathematical models for temperature field calculation in wind-powered axial flux generator]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 3, pp. 23–26.
4. Kharitonov, V.P. *Avtonomnye vetroelektricheskie ustanovki* [Stand alone wind turbines]. Moscow, GNU VIESKh, 2006. 280 p.
5. Balagurov, V.A., Galteev, F.F. *Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami* [Permanent-magnet electric generators]. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 280 p.

Корнилов Дмитрий Сергеевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-05.

Казаков Юрий Борисович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru