

Определение коэффициента полюсного перекрытия быстроходных магнитоэлектрических машин с высококоэрцитивными цилиндрическими магнитами

ИСМАГИЛОВ Ф.Р., ХАЙРУЛЛИН И.Х., ВАВИЛОВ В.Е.

Методом компьютерного моделирования в программном комплексе Maxwell с последующей экспериментальной верификацией определяется коэффициент полюсного перекрытия в быстроходных магнитоэлектрических генераторах с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Получены численные значения коэффициента для машин обозначенного класса, которые могут применяться при проектных расчетах.

Ключевые слова: магнитоэлектрический генератор, постоянные магниты, коэффициент полюсного перекрытия, расчет

Быстроходные магнитоэлектрические генераторы (БМГ) – класс высокоэнергетических генераторов – характеризуются минимальной удельной массой по сравнению с известными генераторами, высоким КПД (до 95%) и надежностью. К достоинствам БМГ относится также возможность достижения высоких значений частоты вращения ротора, ограниченных только его прочностью и возможностями подшипниковых опор, а также отсутствием затрат энергии на возбуждение БМГ [1, 2].

The pole overlapping ratio in high-speed magnetoelectric generators with high-coercitivity permanent magnets is determined using the computer simulation method in the Maxwell software system followed by its experimental verification. Numerical values of pole overlapping ratio are obtained for this class of machines, which can be used in design calculations.

Key words: magnetoelectric generator, permanent magnets, pole overlapping ratio, calculation

Проектирование БМГ – трудоемкий процесс, результат которого зависит от множества ограничений, определяемых техническим заданием, а также от ряда эмпирических коэффициентов, выбираемых проектировщиком. Одним из основных эмпирических коэффициентов, влияющих на материалоемкость активных элементов БМГ, является коэффициент полюсного перекрытия. В стандартных методиках по расчету БМГ [2–5] рекомендуется использовать коэффициент полюсного перекрытия

12. **IEC 60071-1.** Insulation co-ordination. Part 1: Definitions, principles and rules. Edition 8.1, 2011.

13. **Лоханин А.К., Пестряева Л.М., Шуняков В.С.** Технико-экономическая эффективность снижения уровня изоляции в силовых трансформаторах напряжением 110 кВ. – Сб. трудов VI Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в электроэнергетике и промышленности», Москва, 2010.

14. **IEC 60076-3 Ed.2.** Power transformers. Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air., 2000.

15. **CAN/CSA-C88-M90.** Power Transformers and Reactors, 2004.

16. **IEEE Std C57.12.00-2010.** IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, 2010.

17. **Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А.** Максимальные кратности грозовых перенапряжений на подстанции. – Изв. Академии наук. Энергетика, 2012, № 2.

18. **Правила** устройства электроустановок. 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.

19. **Филатов А.А.** Обслуживание электрических подстанций оперативным персоналом. – М.: Энергоатомиздат, 1990, 304 с.

20. **Лихачев Ф.А.** Требования к уровням изоляции нейтралей трансформаторов 110–220 кВ. – Электрические станции, 1965, № 7, с. 54–60.

21. **Калиниченко И.С.** Защита изоляции разземленной нейтрали трансформаторов и защита от перенапряжений. – Электрические станции, 1965, № 7, с. 51–54.

22. **IEC 60076-11 Ed.1.** Power transformers. Part 11: Dry-type transformers, 2004.

23. **ГОСТ Р 54827-2011 (МЭК 60076-11:2004).** Трансформаторы сухие. Общие технические условия.

[02.09.13]

Автор: Ларин Василий Серафимович окончил Институт электроэнергетики МЭИ (ТУ) в 2004 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка эффективного метода расчета внутренней изоляции силовых трансформаторов». Начальник отдела трансформаторов ФГУП ВЭИ. Регулярный член Исследовательского комитета А2 «Трансформаторы» СИГРЭ и представитель Российского национального комитета СИГРЭ в комитете А2 СИГРЭ, член рабочей группы МЭК 60076-3 «Уровни изоляции, испытания изоляции и внешние воздушные промежутки».

в пределах 0,5–0,7 в зависимости от конструктивного исполнения его ротора.

В качестве объекта исследования в стандартных методиках используется БМГ с цилиндрическими магнитами при отношении длины полюсной дуги магнита к полюсному делению, равном менее 0,8. На данный момент в отечественной и зарубежной промышленности производятся БМГ с отношением, принимаемым равным единице [6, 7]. В связи с этим определение коэффициента полюсного перекрытия БМГ указанного типа является актуальной задачей. Объектом исследования в данной работе является БМГ с цилиндрическими высококоэрцитивными магнитами типа NdFeB при отношении длины полюсной дуги магнита к полюсному делению, равном единице, а цель работы – определение коэффициента полюсного перекрытия генератора. Для достижения поставленной цели авторы применяют метод компьютерного моделирования с последующим экспериментальным подтверждением.

Определение искомого коэффициента указанным методом осуществлялось в программном комплексе Maxwell в два этапа. На первом этапе разрабатывался БМГ определенных геометрических параметров в модуле RMXprt и определялись его основные электромагнитные характеристики. Второй этап заключался в создании из модуля RMXprt трехмерной геометрической модели непосредственно в Maxwell и исследовании характеристик электромагнитного поля (распределении магнитной индукции) по средней линии воздушного зазора. Коэффициент полюсного перекрытия определялся косвенным методом по выражению

$$\alpha_i = \frac{B_{\text{ср}}}{B_{\text{dmax}}}, \quad (1)$$

где $B_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение магнитной индукции вдоль средней линии воздушного зазора, $B_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_{\text{dср}}$; n – число членов ряда; $B_{\text{dср}}$ –

значение индукции в определенной точке на средней линии воздушного зазора; B_{dmax} – максимальное значение индукции на средней линии воздушного зазора.

При компьютерном моделировании на объект исследования накладывались граничные условия Дирихле и рассматривался вариант геометрических и электромагнитных параметров объекта, представленный в таблице.

Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 1.

Параметр	Компьютерное моделирование	Экспериментальный макет
Номинальная мощность, кВт	100	100
Диаметр ротора, м	0,059	0,059
Воздушный зазор с учетом бандажной оболочки, м	0,004	0,004
Линейная токовая нагрузка, А/м	45000	45000
Частота вращения, об/мин	60000	60000

B , мТл

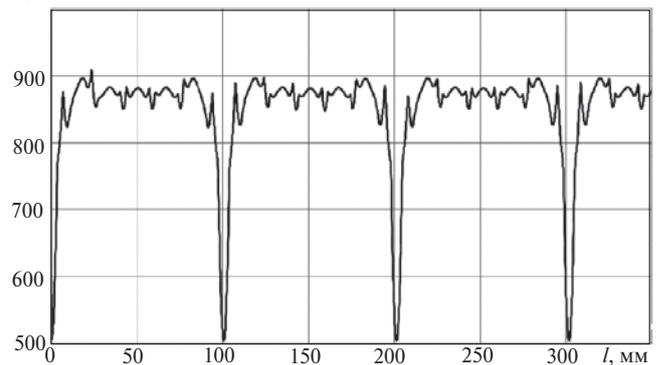


Рис. 1. Спектр распределения магнитной индукции по средней линии (l) воздушного зазора

Расчет полученного спектра по (1) показал, что в исследуемом случае коэффициент полюсного перекрытия составляет 0,9.

Изменяя отношение длины полюсной дуги магнита к полюсному делению, авторы с помощью интерполяции в программном комплексе Matlab получили зависимость коэффициента полюсного перекрытия от указанного соотношения (рис. 2). Зависимость показывает, что при отношении $b_p / t < 0,8$ значение коэффициента полюсного перекрытия лежит в пределах 0,6–0,75, что соответствует стандартным методикам. При увеличении данного соотношения значение коэффициента полюсного перекрытия возрастает и при соотношении, равном 1, находится в пределах 0,85–0,9, которое и рекомендуется принимать.

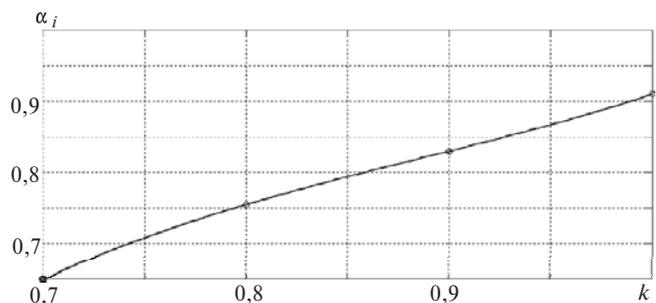


Рис. 2. Зависимость коэффициента полюсного перекрытия от отношения длины полюсной дуги магнита к полюсному делению (k)

Для подтверждения полученного методами компьютерного моделирования результата авторами были проведены экспериментальные исследования БМГ с параметрами, представленными в таблице. Магнитная индукция измерялась милитесламетром ТПУ–05, средняя линия контролировалась толщиной измерительного щупа. Исследуемый экспериментальный образец представлен на рис. 3.

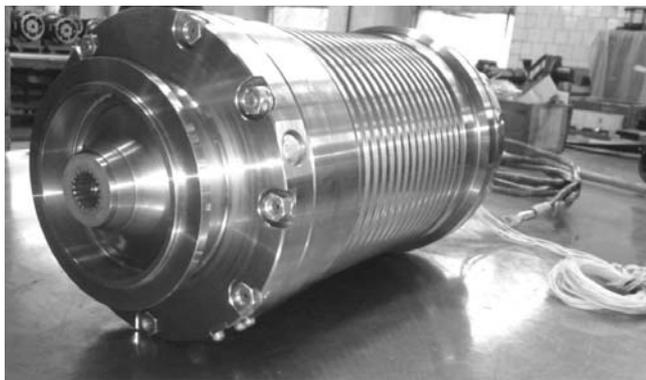


Рис. 3. Экспериментальный образец БМГ

Индукция на средней линии измерялась в семи точках по длине одного полюса, после чего была проведена интерполяция в программном комплексе Matlab. По данным экспериментальных исследований, максимум индукции в воздушном зазоре БМГ составляет 0,77 Тл, а коэффициент полюсного перекрытия равен 0,88, что соответствует теоретическим выводам.

В связи с тем, что полученные авторами результаты отличаются от стандартных, важно сделать сравнительный анализ массогабаритных показателей БМГ, рассчитанных с использованием стандартного коэффициента полюсного перекрытия и определенного в данной работе.

На рис. 4 показана зависимость внешнего диаметра ротора от мощности БМГ при использова-

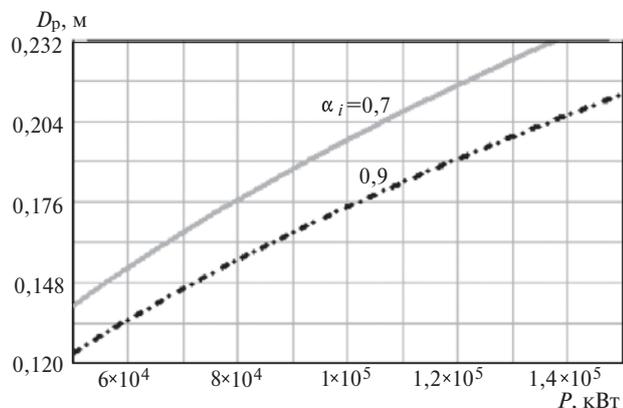


Рис. 4. Зависимость диаметра ротора БМГ от мощности при различных коэффициентах полюсного перекрытия

нии стандартного значения коэффициента полюсного перекрытия и определенного в работе. Из рис. 4 видно, что расхождение составляет около 11%. С учетом того, что масса ротора упрощенно определяется как

$$m_p = \rho \frac{D_1^2}{4} l r, \quad (2)$$

ее завышенное значение при проектных расчетах с использованием стандартного коэффициента полюсного перекрытия составит 25, 27%.

Таким образом, при проектных расчетах БМГ с отношением длины полюсной дуги магнита к полюсному делению, равному 1, рекомендуется брать значения коэффициента полюсного перекрытия в интервале 0,85–0,9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмичев Р.В. Генератор в системе электроснабжения самолета с повышенным уровнем электрификации: URL: <http://www.uacrussia.ru/ru/coomon/img/news/con/Kuzmichev.pdf>
2. Герасин А.А., Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Имитационная модель электромеханических преобразователей энергии с учетом процессов в подшипниковых опорах. — Сборка в машиностроении, приборостроении, 2013, № 2, с. 35–39.
3. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах/Пер. с англ. под ред. З.Г. Каганова. — М.: Энергия, 1981, 352 с.
4. Новожилов А.Н., Исупов Н.А. Потери электроэнергии от технологического эксцентриситета ротора асинхронных двигателей. — Вестник ПГУ, 2010, № 3.
5. Ситин Д.А. Магнитные системы синхронных электрических машин с редкоземельными постоянными магнитами и повышенной частотой вращения: Автореф. дисс ... канд. техн. наук, Москва, 2009, 24 с.
6. Elliott Energy Systems, Inc. 2901 S.E. Monroe Street Stuart, FL 34997 772-219-9449: www.tapower.com
7. Advanced MicroTurbine System. REVIEW © 2002. Capstone Turbine Corporation: www.microturbine.com

[28.03.13]

А в т о р ы: **Исмагилов Флюр Рашифович** окончил Уфимский авиационный институт в 1973 г. Докторскую диссертацию защитил в Уфимском государственном авиационном техническом университете (УГАТУ) в 1998 г. Заведующий кафедрой «Электромеханика», проректор УГАТУ.

Хайруллин Ирек Ханифович окончил Ивановский энергетический институт в 1963 г. Докторскую диссертацию защитил в УГАТУ в 1981 г. Профессор кафедры «Электромеханика» УГАТУ.

Вавилов Вячеслав Евгеньевич окончил УГАТУ в 2010 г. Аспирант кафедры «Электромеханика» УГАТУ.