

коли система не може обслуговувати споживача; S_I – стан, коли система обслуговує споживача.

Відносна пропускна здатність Q для одноканальної системи складає [1]:

$$Q = \frac{\mu}{\lambda + \mu}.$$

Якщо необхідно забезпечити рівень обслуговування потреб споживача не менше, ніж на 80%, то інтенсивність навантаження λ/μ не повинна перевищувати 0,25, тобто інтенсивність потоку обслуговування повинна бути в чотири рази більшою за інтенсивність потоку заявок. При крутоспадаючій електромеханічній характеристиці асинхронного генератора це вимагає використання завищеної встановленої потужності.

Організація двоканальної системи дозволить дещо підвищити ступінь забезпеченості споживача. Якщо скористатися рівнянням Ерланга стосовно двоканальної системи з відмовами:

$$Q = 1 - \frac{\rho^2}{2!} \cdot \frac{1}{\left(1 + \rho + \frac{\rho^2}{2}\right)},$$

то отримаємо наступний результат: при $Q=80\%$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = 1, \text{ тобто інтенсивність потоку обслуговування і заявок зрівнюється.}$$

На рис. 4 наведено залежність $\frac{\lambda}{\mu} = f(Q)$ для одно- та двоканальної системи. Останні мають перевагу перед першими, оскільки пристрої виконання заявок працюють з меншою інтенсивністю.

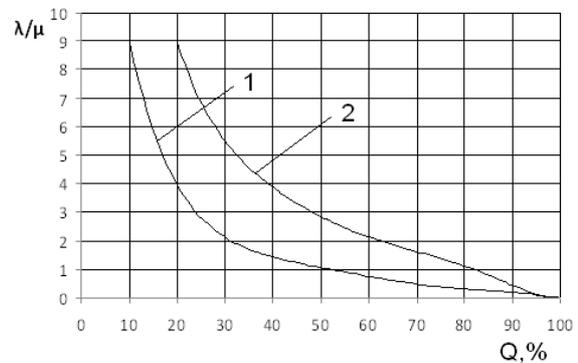


Рис. 4. Залежність інтенсивності навантаження від пропускної здатності одно- (1) та двоканальної (2) системи.

Висновки. При розробці автономної вітрової електричної системи на базі асинхронного генератора необхідно орієнтуватися на схеми, що мають можливість підвищити коефіцієнт заповнення графіка навантаження споживача.

1. Павский В.А. Теория массового обслуживания: учебное пособие / В.А. Павский; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2008. – 116 с.

УДК 621.548

Ю.Н.Перминов, канд.техн.наук, В.П.Коханевич, канд.техн.наук, Н.В.Марченко (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

Сравнение торцевых беспазовых генераторов для ветроустановок с генераторами традиционной конструкции

Проведено сравнение по ряду электрических и электромагнитных параметров двух типов синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов, а именно: в виде торцевой конструкции с беспазовым статором и традиционной конструкции с пазовым статором.

Ключевые слова: ветроэнергетика, синхронный генератор, возбуждение от постоянных магнитов.

Проведено порівняння за кількома електричними та електромагнітними параметрами двох типів синхронних генераторів зі збудженням від постійних магнітів, а саме: у вигляді торцевої конструкції з беспазовим статором і традиційної конструкції з пазовим статором.

Ключові слова: вітроенергетика, синхронний генератор, збудження від постійних магнітів.

© Ю.Н.Перминов, В.П.Коханевич, Н.В.Марченко, 2015

При разработке новых конструкций ветро-электрических установок мощностью до 10 кВт разработчики при выборе генератора отдают предпочтение синхронным генераторам с возбуждением от постоянных магнитов. Существует ряд конструкций данного типа генераторов. При выборе конкретного конструктивного варианта синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов проводится анализ технологии их изготовления, электрические и электромагнитные параметры и характеристики, что в конечном итоге определяет стоимость генератора и отражается на стоимости ветроустановки в целом.

В данной статье предлагается в вышеуказанном диапазоне мощности провести сравнительный анализ двух конструктивных вариантов синхронных генераторов, а именно: в виде торцевой конструкции с беспазовым статором и традиционной конструкции – с пазовым статором. При этом в качестве постоянных магнитов предполагается использование магнитов типа NdFeB или анизотропных ферритов бария или стронция. В анализ будут включены электрические и электромагнитные параметры и характеристики генераторов, технология изготовления рассматриваться не будет.

На рис. 1 показан генератор торцевого исполнения. Статор 1 представляет собой тороидальный сердечник, выполненный из тонколистовой электротехнической стали. Вокруг сердечника намотана однофазная или многофазная обмотка 2. Ротор состоит из постоянных магнитов 3 разноименной полярности, образующих кольца, которые расположены на ярмах 4 с противоположных торцов статора. Подшипники 6 установлены на валу 7. Корпус ротора 8.

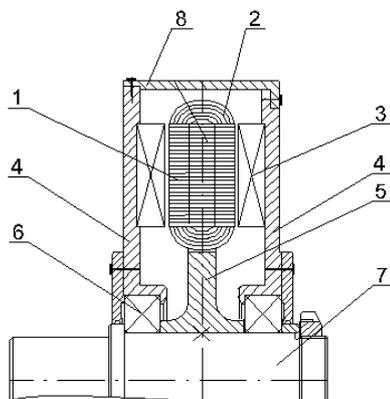


Рис. 1. Общий вид генератора торцевой конструкции с беспазовым статором: 1 – пакет статора; 2 – обмотка; 3 – магниты; 4 – подшипниковые щиты; 5 – ярмо статора; 6 – подшипники; 7 – вал; 8 – корпус ротора.

На рис. 2 изображен генератор традиционной конструкции. На роторе, состоящем из ярма 5, которое выполнено из литой электротехнической стали, размещается радиальная магнитная система 3 с полюсами чередующейся полярности. Статор состоит из пакета 1, в пазы которого уложена обмотка 2.

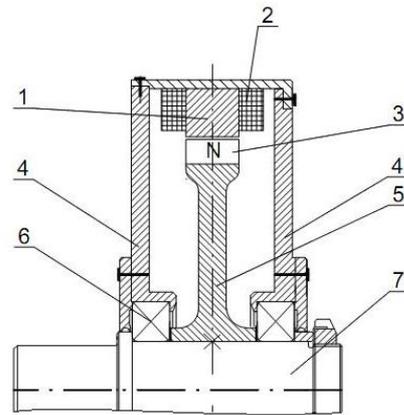


Рис. 2. Общий вид генератора с радиальной магнитной системой и пазовым статором: 1 – пакет статора; 2 – обмотка; 3 – магниты; 4 – подшипниковые щиты; 5 – ярмо ротора; 6 – подшипники; 7 – вал.

Рассмотрим основные электрические и электромагнитные параметры и характеристики генераторов.

Электромагнитный момент генератора находится из выражения:

$$M_{\text{э}} = \alpha_i \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot \pi \cdot D_p^2 \cdot l_p, \quad (1)$$

где α_i – коэффициент полюсного перекрытия; A – линейная нагрузка; B_{δ} – значение индукции в рабочем зазоре; D_p – диаметр ротора; l_p – активная длина ротора.

Как видно из выражения (1), электромагнитный момент определяется удельными электромагнитными нагрузками (A , B_{δ}) и активным объемом ротора (D_p^2 , l_p).

Выражение для линейной нагрузки имеет вид:

$$A = \frac{I_H \cdot N}{\pi \cdot D_p}, \quad (2)$$

где I_H – номинальный ток; N – полное число проводников в обмотке.

Номинальный ток определяется требуемой мощностью и допустимым удельным тепловым потоком с поверхности ротора ($A \times j$), где j – плот-

ность тока в обмотке. Число проводников обмотки N зависит от требуемого напряжения и ограничивается возможностью размещения проводников в определенных геометрических размерах статора. Так, в генераторе (рис. 1) оно ограничивается внутренним диаметром тороидального сердечника статора.

Допустимый удельный тепловой поток сложным образом зависит от конструкции генератора и условий охлаждения, поэтому наиболее достоверными являются данные результатов испытаний в номинальном режиме. Ориентируясь на известные результаты испытаний генераторов малой мощности, плотность тока может быть принята на уровне $j \approx 5 \div 7$ А/мм², а удельный тепловой поток $A \times j \approx (10 \div 12) \cdot 10^{10}$ А²/м³ при естественном охлаждении.

Другой важной допустимой удельной нагрузкой является индукция в рабочем зазоре генератора. Из расчетов и последующих испытаний величина индукции в рабочем зазоре генератора (рис. 2) находится в пределах $B_\delta \approx 0,72 \div 0,8$ Тл при применении магнитов типа NdFeB и ограничивается насыщением зубцов пакета статора.

В генераторах (рис. 1) индукция сложным образом зависит от геометрических и числовых соотношений в конструктивных элементах генератора. В [1] приведены результаты исследования генератора с кольцевыми многополюсными анизотропными магнитами. Установлено, что наибольший электромагнитный момент в данном типе генератора возникает при следующих соотношениях:

- отношение меньшего радиуса тороидального сердечника к большему: $k \approx 0,5$;
- число пар полюсов: $p = 6$.

Максимальный полезный поток полюса обеспечивается меньшим числом пар полюсов и может быть определен для обоих конструктивных вариантов генераторов по приведенному выражению:

$$\Phi_\delta = \frac{B_r \mu_0 \pi^2 \alpha_i (R_1^2 - R_2^2)^2}{4 p^2 \delta \left[\frac{\mu_0 (R_1^2 - R_2^2) \pi}{2 k_\mu p \delta} + \lambda_s + \frac{\mu_\phi \pi (R_1^2 - R_2^2)}{2 p h_M} \right]}, \quad (3)$$

где B_r – остаточная индукция; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; α_i – коэффициент полюсного перекрытия; R_1 – больший радиус кольцевого магнита; R_2 – меньший радиус магнита; δ – полный немагнитный зазор; λ_s – суммарная проводимость рассеяния магнита; h_M – высота магнита; k_μ – коэффициент насыщения; μ_ϕ – магнитная проницаемость магнита.

Индукция в рабочем зазоре будет равна:

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{S_\delta},$$

где $S_\delta = \frac{\pi (R_1^2 - R_2^2)}{2 p}$ – площадь рабочего зазора.

Так как параметры генераторов (рис. 1 и рис. 2) сложным образом зависят от ряда факторов, то для их сравнения проведены расчеты указанных генераторов по определенным алгоритмам [2]. При этом были приняты следующие условия:

- активная длина проводника, находящегося в магнитном потоке, принята одинаковой;
- полезный поток в генераторе (рис. 1) определялся из зависимости (3);
- принятое отношение меньшего радиуса магнитной системы к большему в генераторе (рис. 1) составляло примерно 0,5-0,6.

Результаты расчетов с учетом вышеприведенных требований приведены табл. 1.

Таблица 1. Сравнение генераторов

Параметры	Единица измерения	Генератор по рис. 1	Генератор по рис. 2
Диаметр голого провода	мм	0,62	0,62
Сечение провода	мм ²	0,3	0,3
Число витков в фазе	шт.	947	504
Сопrotивление фазы (активное)	Ом	7,5	5,12
Плотность тока в фазе	А/мм ²	5,5	5,5
Номинальный фазный ток	А	1,65	1,65
Индукция в рабочем зазоре	Тл	0,3	0,85
Активная длина проводника в обмотке	мм	35	35
Фазная ЭДС	В	45,5	44

Параметры	Единица измерения	Генератор по рис. 1	Генератор по рис. 2
Индуктивное сопротивление фазы	Ом	1,25	2,51
Номинальное фазное напряжение	В	33	35,3
Электромагнитная мощность	Вт	164	174
Линейная нагрузка	А/м · 10 ³	11,4	14,85
Удельный тепловой поток	А ² /м ³	6,27	8,16
Габариты корпуса (диаметр/длина)	мм	200/70	180/81
Масса магнитов	кг	1,5	0,6
Масса машины	кг	8	7

Результаты расчета в соответствии с табл. 1 позволяют сделать следующие выводы:

- индукция в рабочем зазоре в генераторе на рис. 1 в 2,8 раза ниже, чем в генераторе на рис. 2, так как проводники в первом генераторе (рис. 1) расположены не в пазах, а на гладкой поверхности тороидального сердечника, поэтому полный немагнитный зазор в данном генераторе на порядок больше, чем во втором генераторе (рис. 2);

- наличие двух магнитных систем в генераторе на рис. 1, расположенных по обоим торцам тора, не сопровождается удвоением полезного потока, так как поток разветвляется между полюсами разноименной полярности, и в результате через контур, занимаемый каждой катушкой обмотки, проходит поток одного полюса;

- при соизмеримых соотношениях роторов в генераторах на рис. 1 и рис. 2 электромагнитные моменты сопоставимы;

- расход магнитов в генераторе на рис. 2 по сравнению с генератором на рис. 1 примерно вдвое меньше из-за малого немагнитного зазора.

Резюмируя все вышеприведенные выводы, можно сказать, что генератор торцевой конструкции с беспазовым статором не имеет явных преимуществ по сравнению с генератором традиционной конструкции с пазовым статором по электрическим и электромагнитным параметрам. Но, учитывая тот фактор, что при сопоставимых мощностях (≈ 170 Вт) на изготовление генератора торцевой конструкции с беспазовым статором используется на 0,9 кг магнитов больше, то (при средней стоимости магнитов типа NdFeB 150 долл. США за кг) стоимость его изготовления соответственно возрастет на ≈ 135 долл. США.

Выводы. 1. Генератор торцевой конструкции с беспазовым статором не имеет явных преимуществ по сравнению с генератором традиционной конструкции с пазовым статором по электрическим и электромагнитным параметрам.

2. При сопоставимых мощностях на изготовление генератора торцевой конструкции с беспазовым статором используется больше постоянных магнитов, что делает экономически более целесообразным изготовление генераторов традиционной конструкции с пазовым статором.

1. *Перминов Ю.Н.* Проектирование электрических машин с многополюсными кольцевыми магнитами // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1988. – №11. – С. 41–47.

2. *Костенко М.П., Пиотровский Л.М.* Электрические машины, часть вторая. – Л.: Энергия, 1964. – 247 с.