

ДК 621.3.049

А.М. Олейников, профессор, д-р техн. наук,

Л.Н. Канов, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

Е.И. Зарицкая

Одесский национальный морской университет

ул. Внешняя (Мечникова), 34, г. Одесса, Украина, 65029

E-mail: office@osmu.odessa.ua

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИОННОГО РАСЧЕТА ТИХОХОДНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Сделан обзор мирового опыта в проектировании синхронных генераторов с постоянными магнитами. Изложена новая методика расчета и проектирования тихоходного синхронного генератора. Приведены результаты расчета, показаны преимущества предлагаемой методики.

В настоящее время разработано и применяется значительное количество типов электрических генераторов для ветроэнергетических установок, в том числе синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ), которые обладают рядом важных преимуществ перед другими типами генераторов, а именно: высокой надежностью, простотой конструкции и обслуживания, связанные с отсутствием скользящих контактов, автономностью ввиду отсутствия цепи постоянного тока для возбуждения, меньшим нагревом благодаря отсутствию потерь на возбуждение.

В то время как вопросам исследования процессов в синхронных генераторах с электромагнитным возбуждением посвящено большое количество работ, для СГПМ такие сведения не систематизированы. В [1, 2] приведена методика расчетов параметров и конструкции СГПМ, рассмотрены приемы стабилизации частоты напряжения, помещены опытные внешние характеристики, приведены упрощенные математические модели магнитоэлектрических машин.

Существующие методики проектирования СГПМ ориентированы в основном на быстроходные машины, находящие применение в летательных аппаратах в качестве генераторов в составе электромашинных преобразователей, автономных источников питания с приводом от воздушных или газовых турбин, маломощных тахогенераторов для измерения частоты вращения главных двигателей аппарата, при этом скорости вращения роторов таких СГПМ находятся в диапазоне от 1000 до сотен тысяч оборотов в минуту. Эти обстоятельства выдвигают на первый план задачу обеспечения механической прочности ротора и магнитной системы, выбора электромагнитных нагрузок и тепловых режимов. Кроме того, в таких установках применяются, как правило, системы регулирования напряжения, требующие специальных подходов к конструкции и устройству магнитной системы [3, 4].

В СГПМ, предназначенных для ветроэнергостановок, следует учитывать специфические особенности: нестационарный характер силы и скорости ветра за относительно короткие интервалы времени; существенные динамические моменты на валу генератора и ветротурбины; отсутствие мультипликатора, как механического звена, способного демпфировать осевые усилия на валу; постоянно действующие в генераторе переходные процессы и связанные с ними токи, электродинамические силы, дополнительные потери энергии и нагрев активных частей электрической машины; малые окружные скорости ротора.

Названные обстоятельства выдвигают на первый план в задачах проектирования СГПМ предельное упрощение конструкции, обеспечение максимальной прочности и надежности, повышение эффективности охлаждения, простоту обслуживания.

Целью статьи является построение методики оптимизационного проектирования и расчета тихоходных СГПМ для ветроэнергетических установок, позволяющей учесть все вышеназванные особенности.

В плане общего конструктивного исполнения представляется целесообразным сохранение традиционной цилиндрической формы статора и ротора, когда обмотка статора расположена в пазах, а постоянные магниты – на периферийной поверхности ротора. Число пазов на полюс и фазу q следует выбирать не меньше одного при однослойной обмотке; для двухслойной обмотки – дробное $1 < q < 2$; паз статора предпочтительнее иметь полузакрытого типа, а зубцы – прямоугольного сечения. На полюсах радиально намагниченных постоянных магнитов необходимо предусмотреть полюсные наконечники из магнитомягкой стали. Увеличение числа полюсов приводит к необходимости увеличения внутреннего диаметра расточки статора, что увеличивает момент инерции ротора и обеспечивает демпфирование динамических колебаний, связанных с порывами ветра.

В качестве предварительных значений линейной нагрузки следует принять $(2,5...3,5) \cdot 10^4 \text{ А ЧМ}^{-1}$; плотность тока в обмотках – $5...6 \text{ А ЧММ}^{-1}$. Магнитная индукция в зазоре принимается в пределах $(0,7...0,8)B_r$. Выбор геометрических размеров активного ядра генератора рекомендуется проводить с учетом принятых стандартных высот осей электрических машин и вырубков листов электротехнической стали.

Расчет зубцовой зоны статора, а также расчет магнитной цепи, схемы замещения, потерь, КПД производится после выбора электротехнической стали, кривые намагничивания которой на различных участках магнитной цепи аппроксимируются наборами экспонент или гипербол вида

$$B = a + bH - ke^{-cH} - de^{-sH}; \quad B = a + bH - \frac{k}{(H + c)^s},$$

где B, H – индуктивность и напряженность магнитного поля; a, b, k, c, d, s – коэффициенты аппроксимации. Ширина образующего полюс магнита определяется полюсным делением, а его высота должна обеспечивать реальный объем магнита. Поэтому одной из основных задач проектирования является определение оптимальных соотношений между размерами магнита, его объемом и основными размерами расточки статора. Соотношения для расчета размеров магнита и магнитной цепи ротора зависят от типа магнитной системы, а объем магнитов определяется мощностью и характером нагрузки. Для конструкции ротора можно рекомендовать тип «звездочка» с призматическими, радиально намагниченными магнитами с полюсными наконечниками или без них, а также ротор коллекторного типа с тангенциально намагниченными призматическими магнитами.

В первом случае, например, объем магнита для заданной активной мощности P при коэффициенте нагрузки $\cos \phi = 1$ рассчитывается по выражению

$$V_M = \frac{1,8 P \alpha \sigma_0 k_{ad} k_{\kappa 3} 10^6}{4 k_{\phi} B_{M0} H_{M\kappa}},$$

где $\alpha \approx 1,15$ – коэффициент, учитывающий падение магнитного напряжения в магнитной цепи; $\sigma_0 \approx 1,15$ – коэффициент рассеяния в режиме холостого хода; $k_{ad} \approx 0,85$ – коэффициент приведения МДС реакции якоря по продольной оси к МДС возбуждения; $k_{\kappa 3} \approx 3$ – кратность тока короткого замыкания; $k_{\phi} \approx 1,11$ – коэффициент формы; $B_{M0} \approx 0,85 B_r$ – индукция при холостом ходе в нейтральном сечении магнита; $H_{M\kappa} \approx 0,5 H_c$ – напряженность поля в магните при установившемся коротком замыкании.

Точность расчета магнитной цепи, параметров и характеристик генераторов зависит от качества расчета потоков рассеяния на роторе, которые, в свою очередь, зависят от следующих факторов: нелинейности параметров магнита и магнитной цепи; неустойчивости характеристик постоянных магнитов; нестационарности режима работы генератора. Здесь целесообразно принять линейное распределение МДС магнита по высоте и использовать приведенную проводимость рассеяния, соответствующую действительному потоку рассеяния, исходящему из рабочей поверхности магнита

$$\Lambda_{\sigma M \Delta M} k_k \Lambda,$$

где $\Lambda_{\Delta M}$ – проводимость рассеяния, определяемая выражением

$$\Lambda_{\Delta M} = \frac{3}{\pi} \frac{h_M}{\Delta_{\max}} \phi_{\alpha} + 1,6 h_M \phi_{\beta} \frac{1}{\pi} 10^{-6}.$$

Здесь

$$\phi_{\alpha} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \ln \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\min}} - \frac{\Delta_{\min}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \ln \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{\min}} \frac{\pi}{2}, \quad \phi_{\beta} = \frac{\pi b_M}{2 \Delta_{\max}} + \ln \frac{3}{\pi} + \frac{\pi b_M}{2 \Delta_{\max}} \frac{\pi}{2} - \frac{\pi b_M}{2 \Delta_{\max}} \frac{\pi}{2} \ln \frac{3}{\pi} + \frac{2 \Delta_{\max}}{\pi b_M} \frac{\pi}{2};$$

l_M, b_M, h_M – геометрические размеры магнита; $\Delta_{\max}, \Delta_{\min}$ – соответственно максимальное и минимальное расстояние между магнитами соседних полюсов. Коэффициент $k_k \approx 0,4...0,6$ зависит от конфигурации межполюсного пространства, коэффициента магнитной проницаемости магнита и определяется в зависимости от соотношения $\frac{\Delta_{\min}}{\Delta_{\max}}$ и величины $\xi = \sqrt{\frac{h_M \Delta M}{\rho_b l_M b_M}}$, где $\rho_b \approx \frac{B_r}{H_c}$.

Внешняя характеристика генератора рассчитывается на основании параметров состояния магнитной цепи ротора и схемы замещения магнитной цепи генератора по продольной оси с учетом путей прохождения магнитного потока и магнитных сопротивлений отдельных участков. В зависимости от соотношения между действительной ЭДС холостого хода $E_{0\partial} = 4,44 f_{H\partial} k \Phi_{\partial 0}$ и требуемой ЭДС

$$E_{0T} = \frac{I_H (x_{qH} x_{dH} + r_{nH}^2)}{\sqrt{x_{qH}^2 + r_{nH}^2}}$$

может быть необходима корректировка в выборе размеров постоянных магнитов и геометрических размеров активной части генератора; в последних выражениях f_H – номинальная частота, w_1 – число витков обмотки статора на фазу, $k_{об}$ – обмоточный коэффициент, $\Phi_{\delta 0}$ – магнитный поток в зазоре в режиме холостого хода, I_H – номинальный ток, x_{qH}, x_{dH} – полные сопротивления по поперечной и продольной осям: $x_{qH} = x_q + x_H$, $x_{dH} = x_d + x_H$, $r_{nH} = r_1 + r_H$.

Потери энергии в СГПМ складываются из потерь в обмотке статора, в стали на перемагничивание и вихревые токи, пульсационных потерь в полюсных наконечниках и механических потерь. Кроме того, должны быть учтены потери от уравнительных токов в обмотке якоря. При работе на выпрямительную нагрузку необходимо учитывать дополнительные потери в массивных элементах ротора от токов обратной последовательности. Полный тепловой расчет генератора представляет одну из наиболее сложных и трудоемких задач, так как необходимо определить превышение температуры различных частей машины над температурой окружающей среды.

Тепловой расчет производится для установившегося продолжительного режима работы генератора. Установившееся превышение температуры пазовой части обмотки статора представляется в виде суммы частичных превышений температуры отдельных частей – пазовой изоляции, зубцов, спинки и корпуса статора. Отдельно учитывается перепад температуры лобовых частей обмотки статора. Суммарный перегрев обмотки статора определяется с учетом перегревов пазовой и лобовой частей и их относительной длины. В случае, если полученные температуры перегрева выше допустимых, необходимо произвести перерасчет генератора, уменьшая тепловые нагрузки обмотки и стали за счет уменьшения плотности тока и магнитной индукции с увеличением главных размеров генератора.

На основании вышеизложенных основополагающих принципов на кафедре судовых и промышленных электромеханических систем СевНТУ разработана методика автоматизированного оптимизационного расчета тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами в виде MathCAD–программы, которая позволяет в диалоговом режиме проектировать подобные генераторы для ветроэнергетических установок мощностью до 50 кВт. Изготовлены и испытаны рассчитанные по предлагаемой методике генераторы мощностью 2,5 и 10 кВт. Опытные характеристики генераторов показали полное соответствие с расчетными зависимостями.

Так, опытный образец СГПМ 2,5 – 375 изготовлен в г. Севастополе и имеет следующие данные: полезная мощность $P_{вн} 2500$; коэффициент мощности $\cos \phi = 1$; номинальная частота вращения $n_{об} = 375$ / ; число фаз $m = 3$; частота тока $f_H = 50$; номинальное фазное напряжение $U_{\phi} = 127$; соединение фаз – звезда; режим работы – продолжительный; исполнение IP23; охлаждение – естественное наружное.

Для сердечника статора выбран лист с размерами: внутренний диаметр $D_{вн} 209$; наружный диаметр $D_{нн} 294$; высота яра $h_{я} 49,5$; число пазов $z_1 = 72$; длина пакета $l_{п} 60$. Тип магнитной системы ротора «звездочка» – призматические радиально–намагниченные магниты, расположенные в пазах ротора без полюсных наконечников.

Паспортные данные использованных постоянных магнитов: остаточная индукция $B_{r} 1,22 \dots 1,28$; коэрцитивная сила (по индукции) $H_{кА} = 907 \dots 963$ / ; коэрцитивная сила (по намагниченности) $H_{кА} 1592$ / ; максимальная энергия $(BH)_{max} = 287 \dots 302$ / ³; температура рабочая $T_{раб} \downarrow 150^0$; температура максимально допустимая $T_{max} \downarrow 180^0$; температура точки Кюри $T_C \approx 310^0$. Это магниты НПО «Ромсат» с геометрическими размерами: длина $l_{м} 30$; ширина $b_{м} 20$; толщина $h_{м} 10$. Использовать такие магниты в магнитной цепи рассчитанного СГПМ возможно при установке одного магнита на два полюса, при этом один полюс организуется тремя рядом устанавливаемыми магнитами. В качестве материала массивного сердечника ротора выбрана магнитомягкая сталь СТ5.

По результатам расчета построены характеристика холостого хода и внешняя характеристика СГПМ, изображенная на рисунке 1.

Из рисунка следует, что выходное напряжение под резистивной нагрузкой линейно падает с ростом тока и в рабочей точке соответствует заданному номинальному режиму. В таблице 1 приведены результаты расчетов различных СГПМ с заданными значениями мощности, частоты вращения и напряжения, выполненные в других организациях. Данные таблицы показывают, что предлагаемая методика обеспечивает конструкцию генератора заданной мощности с меньшими габаритами и большим КПД.

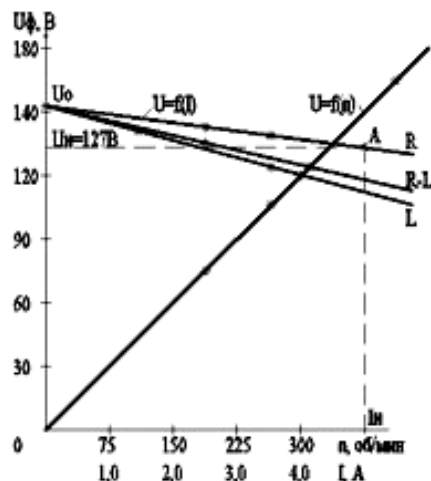


Рисунок 1 – Характеристика холостого хода и внешняя характеристика СГПМ 2,5 – 375

Задачей дальнейших исследований может быть проектирование, изготовление и исследование характеристик экспериментального образца СГПМ.

Таблица 1 – Сравнительные данные генераторов

Исх. данные СГПМ: P , кВт; n , об/мин; U , В	Источник информации, принадлежность	$\cos \phi$	$2p$	D_a / D_i , мм	L_i , мм	δ , мм	Z_1	B_δ , Тл	$A_1 \cdot 10^4$, А/м	V_M , см ³	W_1	a	$\Sigma \Delta P$, Вт	η , %
10–125–220	Германия	0,9	48	766/620	140	–	144	–	–	534	–	–	–	–
10–125–230	ХЭЛЗ–КБ «Южное»	0,9	48	750/620	140	1,5	144	0,545	2,5	970	288	2	1100	90
10,5–125–230	Расчет СевНТУ	0,9	48	635/535	120	1,2	144	0,5	3,14	486	287	4	1050	91

Библиографический список

1. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэлектрогенераторы / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т (ХАИ); Севастополь: Севастоп. нац. техн. ун-т, 2003. — 400 с.
2. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн.2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т (ХАИ); Севастополь: Севастоп. нац. техн. ун-т, 2004. — 519 с.
3. Олейников А.М. Исследование режимов маломощного генератора с постоянными магнитами методом схемного моделирования / А.М. Олейников, Л.Н. Канов. — Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь: Изд-во СевНТУ. — 2007. — С. 29 – 34.
4. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А.Н. Ледовский. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 168 с.

Поступила в редакцию 5.12.2007 г.