

УДК 621.313

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА ДИСКОВОГО ТИПА

А.И. Чучалин, И.О. Муравлев, И.А. Сафьянников, И.Н. Россамахин

Томский политехнический университет

E-mail: refer@tpu.ru

Для устройств обеззараживания воды и воздуха, а также для другого электрофизического оборудования необходимы источники питания с высоким напряжением $\sim 10^4$ В при частотах $10^2 \dots 10^3$ Гц. Авторами проведен комплекс исследований, разработанно индукторного генератора дисковой конструкции, с учетом несинусоидального характера изменения индуктивностей обмоток генератора, переменного насыщения магнитной цепи, нагрева генератора при работе в продолжительном режиме с целью определения оптимальных соотношений параметров генератора и основных энергетических характеристик.

С развитием новых технологий увеличивается число потребителей электроэнергии средней мощности 10^4 Вт, которые необходимо питать высоким переменным напряжением $\sim 10^4$ В при частоте $10^2 \dots 10^3$ Гц. К ним относятся автономные установки с активно-емкостным характером нагрузки, в том числе: мобильные озоногенерирующие устройства для очистки воды и воздуха, установки по обеззараживанию воды, требующие компактных автономных источников электроэнергии. Традиционно питание таких потребителей осуществляется за счет преобразования напряжения и частоты первичных источников электроэнергии, таких как промышленная сеть или автономный электромашинный генератор [1–4].

Решение этой проблемы возможно путем совершенствования существующих или создания новых типов автономных электромашинных генераторов, способных удовлетворять возрастающие требования потребителей. На рис. 1 представлена конструкция и электрическая схема генератора дискового типа. Электрическая схема генератора включает ОВ – обмотку возбуждения, РО – рабочую обмотку генератора, S – коммутирующее устройство. Генератор состоит из ротора – 1 (вращающийся модуль) и статора, который включает в себя блок – 2 с сосредоточенными катушками рабочей обмотки (РО) – 6 и крайние дисковые модули – 3 с обмоткой возбуждения (ОВ) – 5. Ротор выполнен в виде дисков с участками различной проводимости для основного магнитного потока: шихтованными ферромагнитными полюсными вставками – 4 и воздушными промежутками между ними. Внешние магнитопроводы – 3 также выполняют функцию подшипниковых щитов.

Принцип действия генератора основан на создании ЭДС в рабочей обмотке статора при изменении магнитного потока за счет магнитных проводимостей воздушного зазора и изменении собственных индуктивностей обмоток машины. Переменная ЭДС рабочей обмотки на холостом ходу создается в результате изменения ее потоко-сцепления Ψ_a за счет переменной взаимной индуктивности M_{av} с обмоткой возбуждения, запитанной постоянным током

$$e_a = -\frac{d\Psi_a}{dt} = -i_e \frac{dM_{av}}{dt}.$$

Для предварительного исследования характеристик дискового генератора использована методика расчета параметров генератора на основе эквивалентных схем замещения для магнитной цепи. Математическая модель для расчета переходных и рабочих режимов генератора основана на численном решении дифференциальных уравнений электрического равновесия, составленных в соответствии с электрической схемой замещения представленной на рис. 1:

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = -(R_a + R_n) i_a - U_c, \quad \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C_n} i_a,$$

$$\frac{d\Psi_e}{dt} = U_e - R_e i_e,$$

где U_e, U_c – напряжения на зажимах обмотки возбуждения и емкостной составляющей нагрузки; Ψ_a, Ψ_e – потоко-сцепления обмоток статора и возбуждения; i_a, i_e – токи, протекающие по обмоткам; R_a, R_e – активные сопротивления обмоток.

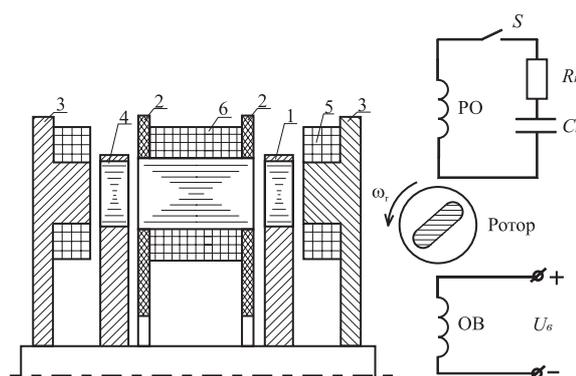


Рис. 1. Конструкция и электрическая схема генератора дискового типа, U_e – напряжение возбуждения, R_n, C_n – активная и ёмкостная составляющие нагрузки

Предварительные расчеты основных энергетических параметров электромашинного индукторного генератора дискового типа при допущении о гармоническом характере изменения индуктив-

ностей обмоток показали возможность достижения мощности, напряжения и частоты для питания вышеуказанного оборудования [5]. Для детального исследования рабочих режимов генератора необходимо решить задачу учета ряда факторов, влияющих на его основные характеристики: несинусоидальный характер изменения индуктивностей обмоток генератора, переменное насыщение магнитной цепи, нагрев генератора при работе в продолжительном режиме.

Тепловые ограничения при работе генератора в продолжительном режиме являются важным фактором, определяющим предельные показатели по удельной мощности генератора. При этом основным, ограничивающим генерируемую мощность в нагрузке, является температура изоляции обмоток генератора.

Для исследования рабочих режимов с учетом реальных кривых изменения индуктивностей генератора использован расчет электромагнитных параметров генератора на основе решения серии полевых задач. Математическая модель расчета магнитного поля методом конечных разностей в индукторном генераторе дисковой конструкции позволила произвести расчет потокоцеплений обмоток и соответствующую матрицу индуктивностей $[L_i] = f(\gamma)$, при различных угловых положениях ротора относительно статора [6].

Полученные несинусоидальные зависимости были представлены рядом Фурье, основанным на замене определенного интеграла суммой конечного числа слагаемых [7]. Зависимости собственных (L_a, L_e) и взаимной (M_{ae}) индуктивностей обмоток статора от угла поворота ротора имеют вид

$$L_a = 51,571 + 30,281 \cdot \cos \gamma + 1,483 \cdot \cos(2\gamma) + 3,024 \cdot \cos(3\gamma) + 0,434 \cdot \cos(4\gamma);$$

$$L_e = 14,093 + 7,694 \cdot \cos \gamma + 0,072 \cdot \cos(2\gamma) + 0,43 \cdot \cos(3\gamma) + 0,163 \cdot \cos(4\gamma);$$

$$M_{ae} = 20,1 + 16,47 \cdot \cos \gamma + 0,9457 \cdot \cos(2\gamma) + 0,941 \cdot \cos(3\gamma) + 0,2974 \cdot \cos(4\gamma).$$

Для учета переменного насыщения магнитной цепи проведен расчет кривой намагничивания машины в относительных единицах $\Phi_0 = f(F_{0\delta})$ рис. 2 (кривая 1). Касательная 2 к начальной части кривой 1 рис. 2, представляет собой зависимость магнитного потока от намагничивающей силы воздушного зазора $\Phi_0 = f(F_\delta)$. Степень насыщения магнитной цепи генератора характеризуется коэффициентом насыщения, который можно определить в виде (рис. 2):

$$k_\mu = \frac{F_{0\delta}}{F_\delta} = \frac{AC}{AB}.$$

Учет насыщения осуществляется коэффициентом k_μ в кривых изменения индуктивностей обмоток генератора, т.е. $L = k_\mu \cdot f(\gamma)$, для различных значений индукций полюса рабочей обмотки (B_i).

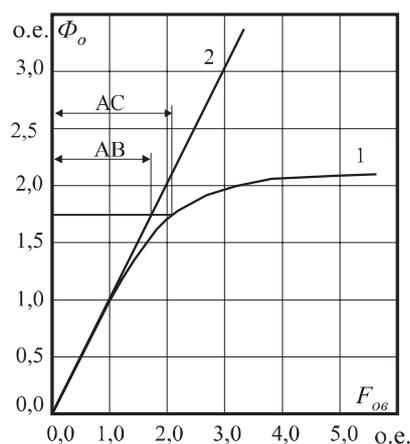


Рис. 2. Кривая намагничивания генератора

В результате математического моделирования переходных процессов и установившихся режимов нагрева обмоток и конструктивных элементов генератора дискового типа выявлены особенности нагрева и охлаждения машины данного конструктивного исполнения [6, 8].

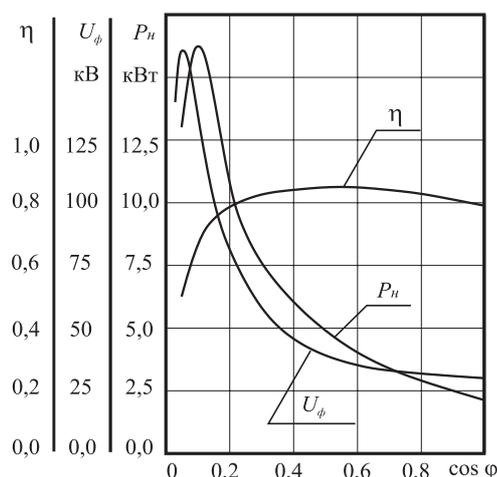


Рис. 3. Зависимости активной мощности, напряжения фазы, КПД от коэффициента мощности

Для расчета энергетических характеристик генератора дискового типа и определения оптимального значения сопротивления нагрузки и коэффициента мощности, с целью достижения максимальных удельных энергетических показателей, проведены исследования допустимого времени работы на активно-емкостную нагрузку с учетом насыщения, несинусоидальных кривых изменения индуктивностей и тепловых ограничений. Расчеты выполнялись для генератора с диаметром активной зоны 0,33 м, числом полюсов $2p = 8$ и напряжением возбуждения $U_e = 240$ В при его работе на активно-емкостную нагрузку с постоянной частотой вращения ротора $n = 3000$ об/мин в продолжительном режиме. На рис. 3 представлены зависимости активной мощности, напряжения в рабочей обмотке и КПД от коэффициента мощности $P_n, U_\phi,$

$\eta = f(\cos\varphi)$, при оптимальном соотношении C_n и R_n , обеспечивающим максимальные энергетические характеристики генератора [9].

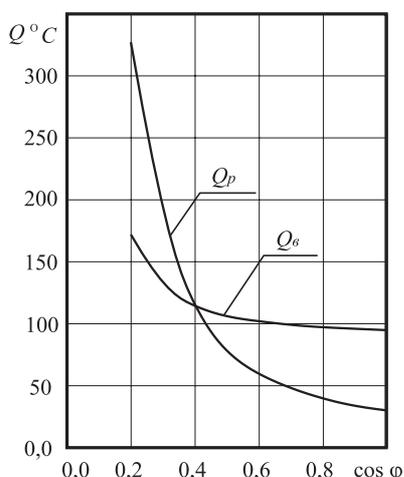


Рис. 4. Значения установившихся температур в обмотках от коэффициента нагрузки

составляющих нагрузки (R_n , C_n) и коэффициентах мощности. Максимальное значение плотности тока рабочей обмотки $J_a \approx 6,5 \text{ А/мм}^2$ соответствует сопротивлению нагрузки 16 кОм при коэффициенте нагрузки 0,3. При этом установившиеся температуры в обмотке возбуждения и рабочей обмотке составляют $Q_e=130 \text{ }^\circ\text{C}$ и $Q_p=175 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 4). Плотность тока обмотки возбуждения изменяется в небольших пределах в зависимости от сопротивления и вида нагрузки $J_b \approx 3,5...4,5 \text{ А/мм}^2$.

В результате анализа полученных энергетических характеристик индукторного генератора дисковой конструкции установлено, что по условиям электрической прочности изоляции и нагрева обмоток, генератор способен работать в продолжительном режиме, начиная с $\cos\varphi = 0,4$ при максимальной мощности потерь в меди $P_{Cu} \approx 475 \text{ Вт}$ и потерь в стали $P_{Fe} \approx 75 \text{ Вт}$ (при индукции в полюсах 1,0 Тл и частоте 400 Гц) с установившейся температурой рабочей обмотки $Q_p=110 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 4). При этом активная мощность генератора составляет $\approx 6,0 \text{ кВт}$, напряжение на рабочей обмотке $\approx 50 \text{ кВ}$.

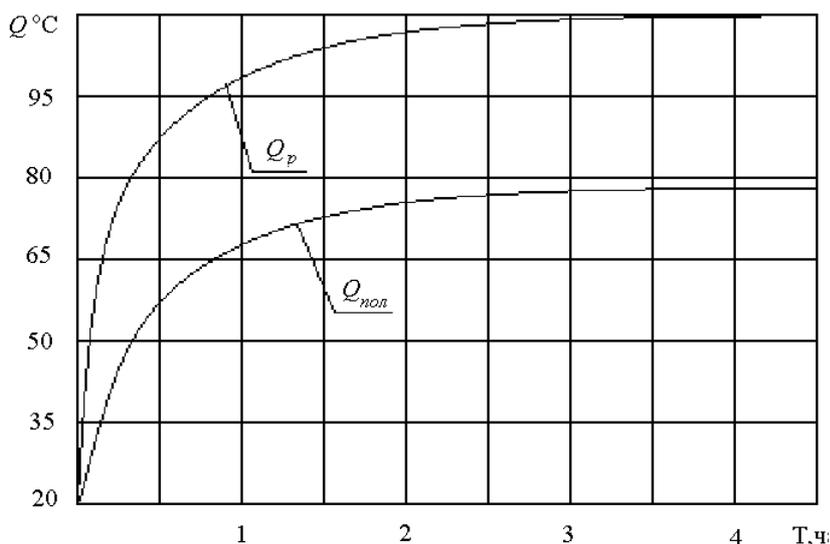


Рис. 5. Кривые изменения температур рабочей обмотки (Q_p) и полюсов ($Q_{\text{полюс}}$) при работе в длительном режиме

Анализируя полученные зависимости, можно определить, что наибольшее значение коэффициента полезного действия $\eta = 0,85$ соответствует $\cos\varphi = 0,5$ при условии максимальной активной мощности в нагрузке $P_{\text{max}} \approx 5 \text{ кВт}$ и напряжении на рабочей обмотке $U_\phi = 40 \text{ кВ}$. Для $\cos\varphi = 0,3$ максимальное значение мощности $P_{\text{max}} \approx 7,5 \text{ кВт}$ достигается при активном сопротивлении $R_n = 16 \text{ кОм}$, которому соответствует напряжение 60 кВ.

Допустимая продолжительность работы генератора в длительном режиме определяется нагревом рабочей обмотки с учетом плотности тока J_a , определяющей энергию потерь в проводниках обмоток, при различных значениях активной и ёмкостной

На рис. 5 показаны расчетные кривые изменения температуры рабочей обмотки и полюсов при включении генератора на длительный режим с указанными значениями мощности и напряжения.

Таким образом, выполненные расчеты энергетических характеристик индукторного генератора дисковой конструкции при работе на активно-емкостную нагрузку в продолжительном режиме с учетом несинусоидального характера изменения индуктивностей и тепловых ограничений подтвердили возможность эффективного применения генератора в качестве источника электроэнергии для питания потребителей с высоким напряжением при частоте до сотен герц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы в электрофизических установках. — Л.: Наука, 1977. — 197 с.
2. Глухих В.А. Мощные энергетические комплексы современных электрофизических установок // Импульсные источники энергии: Тез. докл. 3 Всес. конф. — М.: ЦНИИатоминформ, 1989. — С. 169—170.
3. Mark H. Electromagnetic Launch Technology: The Promise and Problems // IEEE Transactions on Magnetic. — 1990. — Vol. 25, № 1. — P. 17—19.
4. Горбачев Г.Н. Источники питания генератора озона // Электротехника. — 1993. — № 11. — С. 63—65.
5. Чучалин А.И., Муравлев И.О., Сафьянников И.А. Дисконный индукторный генератор // Электромеханика. — 2000. — № 4. — С. 27—31.
6. Чучалин А.И., Муравлев И.О., Сафьянников И.А. Математическое моделирование индукторного генератора дискового типа // Электричество. — 2001. — № 11. — С. 30—35.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1973. — 752 с.
8. Chuchalin A.I., Muravlyov I.O., Safyannikov I.A. Heating and cooling of disk inductor generator // VI International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates, and Young Scientists, Modern techniques and technology, MTT'2000, February 28 — March 3, 2000, TPU, Tomsk, Russia, 2000. — P. 170—172.
9. Chuchalin A.I., Muravlyov I.O., Safyannikov I.A., Rossamakhin I.N. Energetic parameters of inductor generator // The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS'99, Abstracts, June, 20—25, 1999 at Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, 1999. — Vol. 2. — P. 807.

УДК 621.34

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

А.В. Аристов

Томский политехнический университет
E-mail: avv@ido.tpu.edu.ru

Представлены результаты исследований колебательных комплексов на основе электрических машин углового и линейного движения. Основное внимание уделено машинам двойного питания, работающим непосредственно в режиме вынужденных колебаний. Проведен анализ рабочих частотных, регулировочных и механических характеристик данного класса электроприводов, представлены новые алгоритмы управления, обеспечивающие резонансный режим работы.

В последнее время все большее распространение приобретают безредукторные колебательные электроприводы (КЭП), построенные на базе практически всех типов серийно выпускаемых электрических машин, работающих непосредственно в режиме периодического движения. Это обусловлено рядом таких преимуществ, как: исключение потерь энергии в дополнительных механических звеньях преобразования движения, снижение мощности управления и повышения надежности всей системы в целом. Простота и удобство сопряжения электрических машин с электронными узлами управления, возможность плавно и на ходу регулировать параметры механических колебаний при обеспечении высокой равномерности движения, широкий диапазон воспроизведения колебаний по частоте, амплитуде и форме — все это предопределяет бурное развитие и широкое применение КЭП на их основе [1].

Как правило, для создания колебательного режима работы используются те же принципы управления, что и в следящих системах, а именно, применение различных видов модуляции напряжений (токов) при питании обмоток исполнительных двигателей. Различают три основных вида модуляции: линейно-фазовую, балансно-амплитудную и балансно-частотную [2].

Все виды модуляции, положенные в основу возбуждения колебаний, имеет определяющее значение при построении конкретных специализированных КЭП. Так, одновременно с преимуществами следящих систем по управляемости, такие способы возбуждения режима мягкого периодического реверса как амплитудный и частотный сохраняют и их основной недостаток — необходимость применения специальных задающих устройств периодических сигналов. С точки зрения режима работы электромеханического преобразователя, более выгодна в энергетическом отношении балансно-частотная модуляция питающих токов. Но, с другой стороны, управление электрической машиной требует двух регулируемых по частоте мощных генераторов тока, работающих отдельно на каждую из фаз обмотки исполнительного двигателя и управляемых от отдельных задающих устройств. Подключение одной из фаз двигателя непосредственно к сети в данном случае невозможно. Все это, как известно, приводит к значительному увеличению мощности управления. В итоге сложность и трудность создания управляемых по частоте генераторов с малой девиацией частоты сдерживает распространение КЭП с частотно-токовым управлением.

Наиболее перспективным следует признать использование линейно-фазовой модуляции, кото-