

**ОБ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЯХ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ И АНАЛОГИИ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МАШИН**

В. А. ЛУКУТИН, В. В. ПАЦЕВИЧ

(Представлена научным семинаром кафедры теоретических основ электротехники)

Анализ современного состояния теории и практики электростатических генераторов (ЭСГ) показывает, что условиям максимальной мощности (общей и удельной по объему и весу) наиболее полно отвечают дисковые ЭСГ с транспортерами-проводниками; многодисковые ЭСГ с параллельным соединением полюсов и многодисковые ЭСГ с каскадным (последовательным) соединением транспортеров.

Для генераторов с параллельным соединением транспортеров в режиме максимальной мощности имеем [1, 2]

$$U_{н} = U_{в} = \frac{U_0}{2} = \frac{1}{2} E_{пр} d,$$

$$I_{н} = 2pnU_0 \frac{\epsilon_0 S}{d},$$

то есть

$$P = 2pndS \frac{\epsilon_0 E_{пр}^2}{2},$$

здесь p — число пар полюсов ЭСГ,
 n — число оборотов ротора в секунду,
 d — зазор между ротором и статором,
 S — односторонняя рабочая поверхность диска ротора,
 ϵ_0 и $E_{пр}$ — диэлектрическая проницаемость и допустимая напряженность электрического поля в зазоре ротор—статор.

Определим удельную мощность такого генератора. Исходя из условия сохранения равномерности электрического поля генератора примем [1, 2], что толщина транспортеров ротора и индукторов статора h равна или несколько больше удвоенной величины зазора d ротор—статор; т. е. $h \geq 2d$ и, следовательно, величина объема, приходящегося на один диск ротора, будет $V = \pi r_2^2 \cdot 6d = 6dS_1$. Здесь r_2 — внешний радиус диска ротора.

Число полюсов генератора ограничено влиянием паразитных емкостей генератора, которые зависят от величины торцевых поверхностей и ее соотношения с рабочей поверхностью транспортеров. Практически принимают [3], что влияние паразитных емкостей будет еще незначительным, если выполняется равенство $l_1 = (4 \div 5)h$, где

$l = \frac{\pi r_1}{p_1} - a$ — размер транспортера по дуге внутреннего радиуса r_1 ,

a — зазор между транспортерами. Полагая $a \approx d$, получим

$$\frac{\pi r_1}{p_0} = 10d \text{ или } p_0 = \frac{\pi r_1}{10 d}.$$

Величина r_1 определяется условиями надежного крепления транспортеров, надежной изоляции между ними и необходимостью сохранения рациональных форм их поверхности. В практически осуществленных или разрабатываемых в настоящее время генераторах принимают [3]

$r_1 = \left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{3}\right) r_2$, следовательно, в этом случае

$$p_0 = \left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{3}\right) \frac{\pi r_2}{10 d} = \kappa_1 \frac{r_2}{d}.$$

Коэффициент $K_1 = \left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{3}\right) \frac{\pi}{10} = 0,1 \div 0,16$ называют полюсным

коэффициентом, определяющим оптимальное число пар полюсов генератора p_0 .

При принятом соотношении радиусов r_1 и r_2 соотношение между полезной площадью транспортеров S и полной поверхностью S_1 равно

$$\frac{S}{S_1} = 1 - \frac{\pi r_1^2 + 2p_0 a (r_2 - r_1)}{\pi r_2^2} = (0,75 \div 0,9)$$

и для удельной мощности генератора получается

$$P_{\text{уд. макс}} = \frac{\kappa_1 S}{12\pi S_1} \cdot \frac{v}{d} \varepsilon_0 E_{\text{пр}}^2 = \kappa_2 \frac{v}{d} \varepsilon_0 E_{\text{пр}}^2 = (2 \div 3,8) 10^{-3} \frac{v}{d} \varepsilon_0 E_{\text{пр}}^2.$$

При условиях (например, в вакууме) $v = 100$ м/сек, $d \approx 1$ мм, $E_{\text{пр}} = 10^3$ кВ/см и $\rho \approx 4$ кг/дм³ (ρ — удельная плотность объема генератора), близких к принятым в [3], получаем

$$P_{\text{уд. макс}} = 4 \div 8 \text{ квт/кг.}$$

Для генераторов с каскадным соединением транспортеров при большом числе последних величина максимальной мощности на один диск без учета перезарядки равна [4].

$$P_{\text{к. макс}} = n l S \varepsilon_0 E_{\text{пр}} E_{\tau},$$

где E_{τ} — допустимая величина напряженности электрического поля в плоскости движения транспортеров (тангенциальная составляющая),

l — расстояние между заземленной и высоковольтной щетками по пути движения транспортеров.

Величина односторонней рабочей поверхности ротора $S = \pi (r_2^2 - r_1^2)$, где r_1 и r_2 — соответственно внутренний и внешний радиусы диска ротора по транспортерам. Учитывая, что для обеспечения необходи-

мой изоляции по поверхности диска должно выполняться равенство $l = \pi r_1$, получим

$$P_{\text{к. макс}} = 2\pi^2 n \varepsilon_0 E_{\text{пр}} E_{\tau} (r_2^2 - r_1^2) r_1.$$

Величина радиуса r_2 обычно определяется из условий механической прочности ротора и ее можно считать заданной. Величина, соответствующая максимуму мощности, определяется по уравнению $\frac{dP_{\text{к. макс}}}{dr_1} = 0$ и равна $r_1 = \frac{r_2}{\sqrt{3}}$.

Следовательно, величина максимальной мощности равна

$$P_{\text{к. макс}} = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} r_2^2 v \varepsilon_0 E_{\text{пр}} E_{\tau}.$$

Считая как и раньше, что на один диск приходится объем $v = 6d\pi r_2^2$ для удельной мощности, получим

$$P_{\text{к. уд. макс}} = \frac{1}{9\sqrt{3}} \cdot \frac{v}{d} \varepsilon_0 E_{\text{пр}} E_{\tau} = 6,4 \cdot 10^{-2} \frac{v}{d} \varepsilon_0 E_{\text{пр}} E_{\tau} = \kappa_3 \frac{v}{d} \varepsilon_0 E_{\text{пр}} E_{\tau}.$$

Соотношение удельных мощностей сравниваемых типов генераторов в аналогичных условиях на основании полученных уравнений определяется равенством

$$\frac{P_{\text{к. уд. макс}}}{P_{\text{уд. макс}}} = \frac{\kappa_3 E_{\tau}}{\kappa_2 E_{\text{пр}}}.$$

Коэффициенты $\kappa_2 = (2 \div 3,8) 10^{-3}$ и $\kappa_3 = 6,4 \cdot 10^{-2}$ можно назвать коэффициентами использования объема генераторов. Из полученного выше равенства следует, что мощность генераторов, для которых $P \equiv E_{\text{пр}}^2$, будет равна или больше мощности генераторов, для которых $P \equiv E_{\text{пр}} \cdot E_{\tau}$, тогда, когда $\frac{E_{\text{пр}}}{E_{\tau}} \geq \frac{\kappa_3}{\kappa_2} = (20 \div 30)$. Таким образом, при $E_{\tau} = 20 \div 25 \text{ кВ/см}$ необходимо, чтобы $E_{\text{пр}} \geq 400 \div 800 \text{ кВ/см}$.

При этом было принято, что оба типа генераторов имеют равные по величине зазоры ротор—статор. Если величина зазора ротор—статор равна $\approx 1 \text{ мм}$, то максимальное напряжение нагрузки генератора с параллельным соединением полюсов не может превышать значения

$$\frac{E_{\text{пр}}}{2} = 20 \div 40 \text{ кВ/см},$$

в то время, как в генераторах с увеличенным числом транспортеров напряжение почти не зависит от величины зазора ротор—статор, который в этом случае может быть сколь угодно малым. В связи с этим вопрос о сравнении удельных показателей исследуемых генераторов может рассматриваться только в теоретическом плане. При практическом рассмотрении вопроса решающую роль играет величина напряжения нагрузки, которая должна быть получена от генератора.

Физическая интерпретация полученных результатов заключается в том, что электрическое поле, не нуждаясь в замкнутом токопроводе, позволяет более эффективно использовать объем, занимаемый ЭСГ, по сравнению с магнитным полем в электромагнитных машинах (ЭММ).

Рассмотренные многодисковые ЭСГ с каскадным соединением транспортеров отличаются от ЭММ не только характером поля. С энергетической точки зрения их принцип функционирования прямо противоположен принципу функционирования ЭММ. Действительно, в ЭСГ с каскадным соединением транспортеров основная часть электрической

энергии отдельных транспортеров, следовательно и всего генератора, получается за счет механической работы при

$$i = -\frac{dq}{dt} = -\frac{dN}{dt} = 0.$$

В ЭММ электрическая энергия от отдельных витков, следовательно и всего генератора, может быть получена только тогда, когда

$$e = \frac{d\psi}{dt} \neq 0.$$

Аналогом данных ЭСГ с энергетической точки зрения мог бы явиться, очевидно, ЭМГ с витками, находящимися в состоянии сверхпроводимости. При перемещении такого витка из сильного магнитного поля в слабое или наоборот в нем наводятся токи, которые поддерживают магнитный поток, связанный с данными витками, постоянным. Таким образом, в этом случае, как и в ЭСГ,

$$\frac{d\phi}{dt} = 0.$$

Механическая работа, затраченная на перемещение витка, переходит в энергию магнитного поля, которую можно использовать, если при максимально возможном токе витка, определяемом величиной возможного магнитного потока, в его рассечку включить сопротивление нагрузки. Тогда только в этот момент передачи энергии в нагрузку

$$\frac{d\psi}{dt} \neq 0.$$

Так же как и в ЭСГ для транспортера в этот момент

$$\frac{dN}{dt} \neq 0.$$

Отсутствие сверхпроводящих витков в обычных условиях не позволяет сколько-либо эффективно использовать данный способ преобразования механической энергии в электрическую в ЭММ.

В то же время наличие хороших диэлектриков позволяет достаточно долго при высоких напряжениях удерживать заряды на поверхности. Именно поэтому в ЭСМ наибольшее распространение получили генераторы, у которых преобразование механической энергии в электрическую

происходит в основном при $\frac{dN}{dt} = 0$ и не используются генераторы,

у которых преобразование энергии происходит при $\frac{dN}{dt} = 0$.

Таким образом, ЭСМ и ЭММ, соответствующие друг другу по принципу дуальности, не соответствуют друг другу по эффективности с энергетической точки зрения.

Области возможного применения ЭСГ уже в настоящее время весьма разнообразны [5, 6]. Такие качества, как возможность получения высокой стабильности и исключительно слабой пульсации выходного напряжения, позволяют получать интенсивное монохроматическое излучение, ограниченный ток короткого замыкания делает их почти безопасными при использовании в текстильной промышленности, при электростатической окраске и других областях промышленности. Наконец,

с расширением исследований в области разработки ЭСГ с высокими удельными показателями появится множество новых идей и возможностей, которые откроют новые области применения, неподозреваемые или кажущиеся лишь фантастикой в настоящее время.

ЛИТЕРАТУРА

1. Под редакцией А. А. Воробьева. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения, ГЭИ, 1960.
 2. Mogel R., Contribution á l'étude rationnelle des machines électrostatique (диссертация) Grenoble, 1948.
 3. Gignoux D., Electrostatic generators for space application, 102^{-e}m colloque du SNRC, Grenoble, 1960.
 4. А. Ф. Калганова, В. В. Пацевич. Известия вузов, «Электромеханика», № 8, 1963.
 5. Под редакцией акад. А. К. Вальтера. Электростатические генераторы, Атомиздат, 1959.
 6. Н. Фелиси. Электричество, № 1, 1962.
-