

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ТРАНСПОРТЕРОВ И ИНДУКТОРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКОВЫХ ЭСГ

А. П. КОНОНОВ

(Представлена научным семинаром кафедры теоретических основ электротехники)

При исследовании работы опытных образцов ЭСГ дискового типа с каскадным соединением транспортеров-проводников было замечено, что на электрические характеристики ЭСГ очень влияют геометрические размеры некоторых элементов. К ним можно отнести: размеры диска ротора, размеры индукторов и транспортеров-проводников.

В ряде работ [1, 2] даны расчеты по выбору наилучшего профиля электродов для создания равномерного электрического поля в ЭСГ.

Но в указанных работах нет анализа влияния геометрических размеров электродов на электрические характеристики генератора. Это, вероятно, объясняется трудностью аналитического расчета, так как одновременный учет многих факторов (размер и форма индуктора, размер и форма транспортера, расстояние между транспортерами, воздушный зазор и др.) невозможен.

Поэтому для выяснения наилучших геометрических соотношений некоторых элементов был выбран экспериментальный путь. Был сконструирован и изготовлен опытный одnodисковый генератор с каскадным соединением транспортеров-проводников. Конструкция данного генератора позволяет просто и достаточно быстро выполнять ряд операций, таких как: смена ротора, изменение количества пар полюсов, замена индукторов, изменение положения и формы щеток, изменение зазора между ротором и статором.

Для указанного генератора были изготовлены индукторы трех размеров и семь роторов с различным числом и формой сечения транспортеров, запеченных в эпоксидную смолу. Внешний диаметр всех роторов равен 140 мм, длина транспортеров равна 25 мм. Все исследования работы опытного генератора проводились в атмосфере углекислого газа при давлении 4 атм.

При анализе зависимостей $I_{кз} = f(U_v)$ (рис. 1) было замечено, что величина тока короткого замыкания увеличивается с ростом числа транспортеров и уменьшением их радиуса.

Для определения наилучшего радиуса транспортера, при котором ток короткого замыкания будет иметь максимальное значение, проведен анализ следующего уравнения [4]:

$$I_{кз} = K_i \cdot n \cdot 2 \cdot m C_0 U_v, \quad (1)$$

где K_i — коэффициент перезарядки,

n — число оборотов в минуту,

m — количество транспортеров-проводников,

C_0 — частичная емкость одного транспортера относительно статора,

U_b — напряжение возбуждения.

Транспортеры были взяты с круглым сечением потому, что такая форма электрода является наиболее эффективной при перемещении зарядов в области высокого градиента [5].

Величину коэффициента перезарядки можно определить по формуле [6]

$$K_i = \sqrt{1 + 4 \frac{C_1}{C_0}}, \quad (2)$$

где C_1 — частичная емкость между соседними транспортерами.

Зависимости частичных емкостей C_0 и C_1 были определены с помощью моделирования в электролитической ванне. В результате обработки опытных данных получены эмпирические зависимости для указанных величин при однорядном расположении транспортеров-проводников:

$$C_0 = \frac{4,3 E l a}{D_{пр}}, \quad (3)$$

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{1}{3} \left(\frac{D_{пр}}{2r} - 1 \right) \left(\operatorname{sc} \frac{\pi r}{a} - 1 \right)^{0,8}, \quad (4)$$

где E — диэлектрическая проницаемость смолы,

l — длина транспортера,

a — расстояние между осями транспортеров,

r — радиус транспортера.

$$D_{пр} = d_{см} + 2r + E d_{воз},$$

$d_{см}$ — толщина диэлектрика,
 $d_{воз}$ — воздушный зазор.

С учетом зависимостей (3) и (4) уравнение (1) можно записать:

$$I_{кз} = U_b \cdot n \cdot 2 \cdot m \frac{4,3 E l a}{D_{пр}} \sqrt{1 + 4 \left[\frac{1}{3} \left(\frac{D_{пр}}{2r} - 1 \right) \left(\operatorname{sc} \frac{\pi r}{a} - 1 \right)^{0,8} \right]}$$

или

$$I_{кз} = \frac{8,6 U_b n m E l a}{d_{см} + 2r + E d_{воз}} \sqrt{1 + \frac{4}{3} \left(\frac{d_{см} + 2r + E d_{воз}}{2r} - 1 \right) \left(\operatorname{sc} \frac{\pi r}{a} - 1 \right)^{0,8}}. \quad (5)$$

При изменении радиуса транспортера r , оставляя U_b , n , a , l , $d_{см}$, $d_{воз} = \text{const}$, видно, что $I_{кз}$ будет возрастать с уменьшением радиуса r и увеличением количества транспортеров m . Поэтому для получения максимального тока короткого замыкания в генераторе с неизменным радиусом диска ротора необходимо увеличивать число транспортеров-проводников и уменьшать их радиус. Однако уменьшение радиуса транспортеров связано с трудностью изготовления.

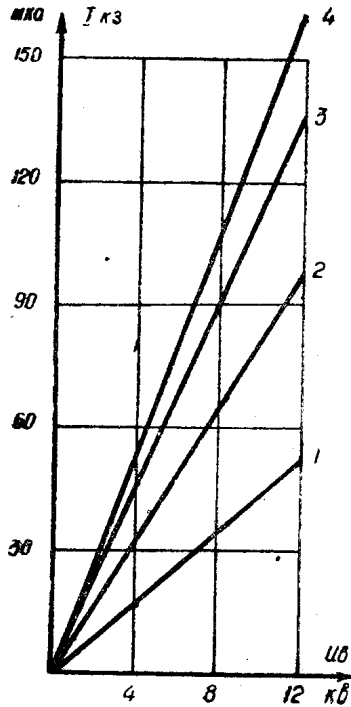


Рис. 1. График зависимости $I_{кз} = f(U_b)$ роторов с различным числом транспортеров: 1 — для ротора с $m = 27$, 2 — для ротора с $m = 45$, 3 — для ротора с $m = 54$, 4 — для ротора с $m = 74$.

В ТПИ разработаны два метода изготовления роторов ЭСГ с транспортерами малого радиуса.

1. Изготовление ротора ЭСГ с помощью печатных схем.
2. Изготовление ротора с помощью наматывания на диск ротора тонкой проволоки.

Эти два метода могут быть использованы при серийном выпуске генераторов.

Кроме того, размеры транспортеров и их количество оказывают влияние на пульсацию выходного напряжения. При эксперименте проводилось осциллографирование кривой напряжения. Осциллограммы показывают, что наибольшая пульсация напряжения в генераторе наблюдается при малом числе транспортеров. С увеличением числа транспортеров и уменьшением их радиуса пульсация напряжения уменьшается.

Для выявления оптимального размера индуктора были сняты зависимости $I_{кз} = f(U_v)$ (рис. 2) при одном роторе, но с разными индукторами.

Опыт показал, что индуктор имеет какой-то оптимальный размер по ширине. Длина индуктора не должна быть меньше длины транспортера.

На основании экспериментальных данных при различных геометрических соотношениях индукторов и транспортеров был построен график зависимости тока короткого замыкания от отношения ширины индуктора к ширине (или диаметру) транспортера (рис. 3). Из графика видно, что для опытного генератора ток короткого замыкания имеет максимальное значение в том случае, когда это отношение равно $3,5 \div 4$.

Для определения радиуса диска ротора воспользуемся условием электрической прочности диэлектрика (смолы). Исходя из этого условия, можно определить величину промежутка, который может выдержать заданное напряжение при $E_{пр}$ диэлектрика.

$$d = \frac{U}{E_{пр}}, \quad (7)$$

где d — расстояние между индукторами по дуге внутреннего радиуса (R_v) диска ($d = \pi R_v$) по чистому диэлектрику,

U — напряжение генератора,

$E_{пр}$ — электрическая прочность диэлектрика.

При помещении в диск ротора транспортеров необходимо иметь общую длину d всех промежутков смолы по внутреннему радиусу между индукторами такой, чтобы эта длина выдерживала заданное напряжение при $E_{пр}$ диэлектрика для неравномерного поля.

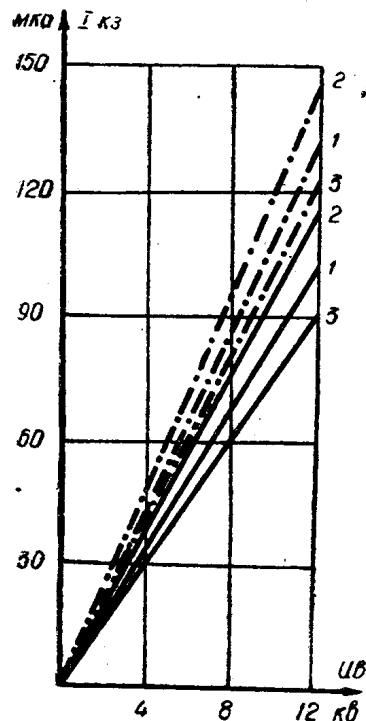


Рис. 2. Характеристики $I_{кз} = f(U_v)$ при различных индукторах: 1 — характеристика с широким индуктором, 2 — характеристика со средним индуктором, 3 — характеристика с узким индуктором. — ротор с числом транспортеров $m = 45$, — — — ротор с числом транспортеров $m = 54$.

Длина окружности радиуса R_B равна $2\pi R_B$, количество транспортеров m равно

$$m = \frac{2\pi R_B}{a},$$

тогда величина d будет равна $d = \frac{1}{2} m \cdot b$, где b — расстояние между соседними транспортерами по диэлектрику (смоле), m — количество транспортеров в диске.

$$d = \frac{1}{2} \frac{2\pi \cdot R_B}{a} \cdot b = \frac{\pi R_B}{a} \cdot b. \quad (8)$$

Сравнивая уравнения (7) и (8), получаем

$$R_B = \frac{U \cdot a}{\pi E_{\text{пр}}} \cdot b. \quad (9)$$

Значение наружного диаметра определяют из условия максимальной мощности [3], так как

$$\begin{aligned} P_H &= U_H \cdot I_H, \\ \text{а } U_H &\equiv E_r \pi R_B \quad \text{и} \quad I_H \equiv n \sigma \pi (R_H^2 - R_B^2) \\ P &\equiv E_r \pi R_B n \sigma \pi (R_H^2 - R_B^2) \\ \frac{\partial P}{\partial R_B} &= R_H^2 - 2R_B^2 = 0 \\ R_H &= \sqrt{3} R_B. \end{aligned} \quad (10)$$

После определения R_H необходимо проверить его величину по условию критической линейной скорости. Критическая линей-

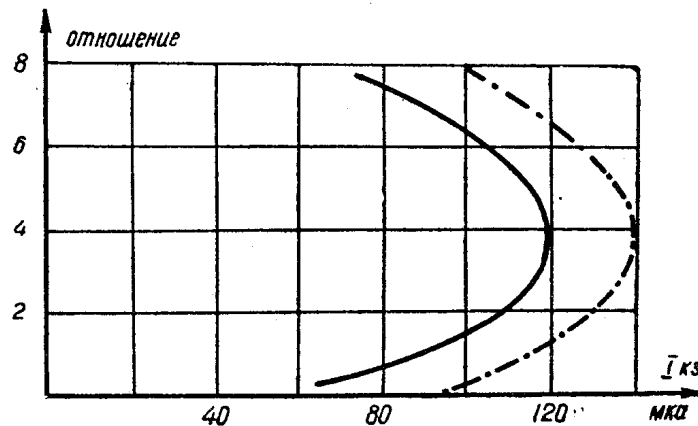


Рис. 3. Зависимость тока короткого замыкания от отношения ширины индуктора к ширине транспортера для различных роторов. — ротор с числом транспортеров $m = 45$, —.—.— ротор с числом транспортеров $m = 54$.

ная скорость для диска из эпоксидной смолы равна $V_K = 100 \text{ м/сек}$ [5, 7].

$$V_K = \frac{\pi n \cdot R_H}{30},$$

где n — число оборотов в минуту (принимая $n = 3000$ об/мин, так как большинство двигателей переменного тока имеет такое число оборотов).

Тогда

$$R_n = \frac{V_k \cdot 30}{n \cdot \pi} = 320 \text{ мм.}$$

Величина a может быть выражена следующей зависимостью

$$a = 2r + b \quad (\text{так как } a > 2r).$$

Вышеуказанные методы изготовления роторов ЭСГ позволяют изготовить ротор с радиусом транспортеров, равным 0,15 мм ($r = 0,15$ мм).

Расстояние между транспортерами по смоле (b) определяется возможностью запекания электродов в эпоксидной смоле.

Как показала практика, наименьшее расстояние между транспортерами можно получить равным 0,1 мм ($b = 0,1$ мм).

Используя уравнение (9), определяем величину R_b при $E_{пр} = 50$ кВ/см [8, 9] для следующего ряда напряжений.

Таблица 1

U	100	150	200	300	400	500	кВ
R_b	25,5	38,2	51	76,5	102	127	мм
$R_n = \sqrt{3} R_b$	44,2	66,4	88,5	133	176,5	220	мм

При сравнении R_n (табл. 1) с наружным радиусом, подсчитанным из условия критической скорости при $n = 3000$ об/мин, видим, что все радиусы для указанного ряда значительно меньше расчетной.

Кроме того, для достижения критических размеров эти радиусы могут быть увеличены еще в несколько раз.

Для напряжений ряда $U = 100 \div 300$ кВ можно увеличивать значение тока генератора за счет роста радиуса диска, то есть за счет увеличения числа транспортеров.

Так как величина тока $I \equiv \pi (R_n^2 - R_b^2)$, то при увеличении радиусов в два раза получаем рост тока в 4 раза.

Для ряда напряжений $U = 100 \div 200$ кВ при увеличении радиусов в три раза получается рост тока в 9 раз.

При таком увеличении радиусов диска с неизменным количеством пар полюсов происходит дальнейшее увеличение напряжения во столько раз, во сколько возрастает радиус диска. При сохранении неизменного напряжения с увеличением диска в два раза можно поставить две пары полюсов, при увеличении в три раза соответственно три пары полюсов.

В итоге величина тока в генераторе может возрасти в первом случае в 8 раз, а во втором в 27 раз от первоначального значения.

Путь увеличения размеров диска ротора заманчив, но рост диска связан с рядом трудностей. К одной из основных можно отнести изготов-

Таблица 2

U	100	150	200	300	мм
2 R_n	88,4	122,8	177	266	мм
3 R_n	132	198	266	—	мм

ление цилиндра давления большого радиуса. Имеется другой путь — увеличивать не размеры диска, а их количество. Но здесь возникают свои трудности, которые также необходимо решить.

Итак, исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. В диске ротора необходимо иметь как можно больше транспортеров при очень малом радиусе, чтобы с уменьшением радиуса транспортеров не делать слишком тонкий диск, необходимо изготавливать диск с двухрядным расположением транспортеров. Вышеуказанные методы это предусматривают.

2. Индуктор должен иметь оптимальный размер и перекрывать (по ширине) не менее 3-х транспортеров, т. е. отношение ширины индуктора к ширине транспортера должно быть равным 4.

3. Радиус диска ротора для определенной скорости вращения необходимо брать по возможности большим.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воробьев и др. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения. ГЭИ, 1960.
2. N. Felici. Les Surfaces a champ électrique constant, Rev. Gen. Electricite 59, № 11, 1950.
3. Л. С. Полотовский. Емкостные машины постоянного тока высокого напряжения. ГЭИ, 1960.
4. В. В. Пацевич. Некоторые вопросы теории и расчета ЭСГ с транспортерами-проводниками. Диссертация, ТПИ, 1964.
5. В. И. Левитов, А. Г. Ляпин. Применение сил электрического поля в промышленности и сельском хозяйстве. ВНИИЭМ, 1964.
6. В. А. Лукутин, В. В. Пацевич, В. Д. Эськов. Электрический расчет ЭСГ. Тезисы докладов на VI Межвузовской научной конференции по ускорителям.
7. В. И. Левитов, А. Г. Ляпин. Электростатические генераторы с жестким ротором, ч. 1, ЦИНТИПРИБОРЭЛЕКТРОПРОМ, 1963.
8. Д. В. Разевиг и др. Техника высоких напряжений. Энергия, 1964.
9. Д. Мик, Д. Крэгс. Электрический пробой в газах, ИЛ., 1960.