

ПОСТРОЕНИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ МАШИН

В. А. ЛУКУТИН

(Представлена научным семинаром кафедры теоретических основ электротехники
и лаборатории роторных ЭСГ НИИ ЯФ)

Для каждой электростатической машины, как и для любой индукционной, можно построить внешнюю или нагрузочную характеристику. Эта характеристика позволяет судить об основных особенностях машины и возможных областях ее применения. Для проектируемого образца характеристику желательно просчитать теоретически, используя в качестве исходных данных размеры изделия и физические свойства используемых материалов. Особенно важно уметь спроектировать электростатический генератор (ЭСГ), который будет удовлетворять заранее заданной внешней характеристике.

В настоящей статье излагаются основные принципы определения аналитических выражений нагрузочных характеристик электростатических (емкостных) машин. Формулы должны учитывать влияние геометрических размеров конструктивных элементов изделия и их физических свойств на электрические параметры проектируемого генератора. Поставленная задача весьма сложна, так как электрические данные машины зависят от очень многих факторов и полный их учет приведет к очень громоздким соотношениям. Однако при помощи обычно принимаемых допущений и упрощений можно получить достаточно удобные для инженерных расчетов формулы. Метод в равной степени пригоден для вычисления нагрузочных характеристик машин с диэлектрическим ротором и с ротором с проводящими транспортерами.

Электростатический генератор состоит из статора и вращающегося ротора, переносящего заряды либо на своей поверхности (диэлектрический ротор), либо на проводящих транспортерах, укрепленных в теле ротора. Напряжение на выходе машины определяется потенциалами транспортеров, а ее ток — зарядами стержней или поверхности ротора. Следовательно, для определения выходных параметров машины нужно уметь определять заряды и потенциалы электродов ротора и статора.

Ниже рассматривается ЭСГ с проводящими транспортерами, на примере которого удобнее пояснять вывод формул, однако все рассуждения могут быть распространены и на генераторы с диэлектрическим ротором.

На рис. 1 представлено сечение рабочего объема машины, где область с диэлектрической проницаемостью ϵ_1 представляет собою тело ротора со стержнями транспортеров, которое отделяется от статора газовой или жидкой средой с проницаемостью ϵ_0 . На верхней и нижней границах области видны индукторы, создающие электрическое поле

статора. Щетки, служащие для нанесения и снятия зарядов, на рисунке не показаны.

Если полагать диэлектрик ротора идеальным, то заряд транспортера в процессе вращения машины остается неизменным и равным q , а после коммутации (съем заряда через щетку) величина его скачком изменяется до q' . Потенциалы стержней изменяются при их перемеще-

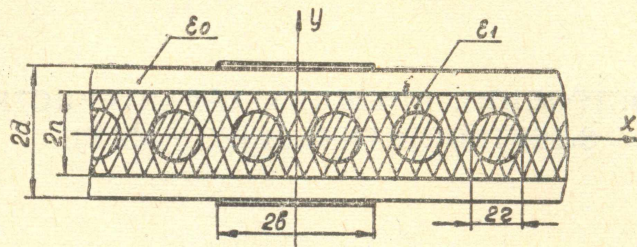


Рис. 1

нии, но в установившемся режиме работы потенциал любого стержня, находящегося в одном и том же положении относительно статора, будет одинаковым. В связи с этим оказывается возможным рассматривать стационарную систему электродов, на которых размещены заряды при определенных потенциалах. Иначе говоря, требуется рассчитать электростатическое поле в рабочем пространстве машины. Так как пространство ограничено параллельными статорными пластинами, расстояние между которыми меньше осевой длины проводящих транспортеров, то электрическое поле в данном случае можно считать двумерным. Граничные условия обычно удается сформулировать применительно к каждой конструкции генератора.

Будем пользоваться методом наложения, для чего сначала рассмотрим поле, создаваемое статором в области с трехслойным диэлектриком, причем на границе $y = \pm d$ потенциал известен и равен $U_{ст}(x, d)$, затем рассчитаем поле в той же области от зарядов транспортеров при нулевых граничных условиях (поле ротора). В первом случае нужно решить задачу Дирихле для уравнения Лапласа при заданных граничных условиях, во втором — аналогичную задачу для уравнения Пуассона при нулевых условиях.

В данной статье собственно расчет поля не рассматривается, так как это самостоятельный и сложный вопрос. Будем полагать, что соответствующие аналитические решения уже имеются [2], при этом совершенно безразлично, каким способом они получены и какую имеют форму. В общем случае потенциалы поля статора и ротора будут представлять собою функции координат, геометрических размеров (a, d, n, r, b), физических свойств сред (ϵ_1, ϵ_0), напряжения возбуждения U_v и нагрузки U_n .

Электрическое поле статора создается заряженными высоковольтными индукторами, находящимися под напряжением нагрузки U_n , и полупроводящими дисками или цилиндрами, образующими сам статор. Потенциал точек области $y=0$, где помещаются транспортеры (рис. 2, а), будет меньше, чем на границе области, и выражается функцией $U_{ст}(x, 0)$.

Теперь обратимся к потенциальной функции поля ротора. По существу мы будем рассматривать электрическое поле генератора, работающего в режиме короткого замыкания, когда потенциал статора равен нулю. Это справедливо для случая кондукционной схемы возбуждения и когда статорные пластины изготовлены из слабопроводящего материала.

Будем полагать, что съем зарядов с транспортера происходит под каждым высоковольтным индуктором только один раз за один оборот ротора, как это бывает у генераторов с узкими щетками любой формы. Разряд транспортера происходит настолько быстро, что ротор за это время не успевает сколько-нибудь заметно переместиться. При столь быстром процессе подошедший к щетке транспортер имеет поочередно два заряда: непосредственно перед коммутацией q и сразу после ее завершения q' .

На рис. 2, б показан график распределения зарядов по транспортерам, причем начало координат помещено между стержнями, несущими различные заряды. Для удобства расчета можно исходные заряды представить в виде сумм

$$q = q_a + q_b, \quad q' = -q_a + q_b. \quad (1)$$

Такая разбивка не противоречит принципу наложения и позволяет несколько упростить граничные условия.

Находим потенциальные функции для рассматриваемой области сначала от зарядов q_a , а затем $-q_b$. В общем виде их можно написать так:

$$U_{pa} = q_a N(x, y, a, d, n, r, \varepsilon_0, \varepsilon_1), \quad (2)$$

$$U_{pb} = q_b M(x, y, a, d, n, r, \varepsilon_0, \varepsilon_1).$$

Потенциал любой точки рабочего пространства машины можно найти суммированием функций поля статора и ротора. Если в записанную таким образом формулу подставить $y=0$, то получим потенциал точек, в которых помещаются транспортеры:

$$U_{tr}(x) = U_{ст}(x, 0) + U_{pa}(x, 0) + U_{pb}(x, 0). \quad (3)$$

Непосредственно воспользоваться последним равенством нельзя, так как в него входят неизвестные заряды, величина которых определяется напряжениями возбуждения и нагрузки.

На рис. 2, а, в, г изображены примерные кривые распределения потенциалов по транспортерам. Если их просуммировать, то получим график распределения потенциалов по транспортерам ротора (рис. 3, а), соответствующий уравнению (3). Очередной транспортер, подходящий к высоковольтному индуктору, имеет потенциал более высокий, чем у щетки, соединенной с индуктором и находящейся поэтому под напряжением U_n . В определенный момент времени, когда упомянутый стержень находится на расстоянии $x = -\gamma$ от щетки, происходит его разряд через искру. За время разряда ротор практически не успевает переместиться и разрядившийся транспортер оказывается под потенциалом щетки U_n . Потенциалы транспортеров непосредственно перед коммутацией и сразу после ее завершения представлены соответственно кривыми 1 и 2 на рис. 3, а. Из рисунка непосредственно следует равенство

$$U_{pb}(-0,5a, 0) = U_{ст}(-\gamma, \pm d) - U_{ст}(-\gamma, 0) + U_{pa}(-0,5a, 0). \quad (4)$$

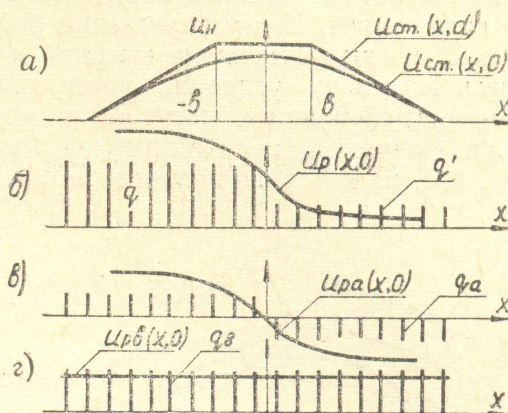


Рис. 2. Распределение зарядов и потенциалов по транспортерам ротора: а — потенциалы транспортеров в поле статора; б — потенциалы и заряды транспортеров в режиме короткого замыкания

Обратимся теперь к зоне индуктора возбуждения. При кондукционной схеме возбуждения характер поля статора под низковольтным и высоковольтным индукторами будет одинаковым. Потенциальные функции ротора (режим короткого замыкания) также будут совершенно аналогичны. Эти утверждения будут справедливы, если конструкции щеток и индукторов на высокой и низкой стороне совершенно одинаковы. При этих условиях потенциалы транспортеров, расположенных в зоне возбуждения, могут быть найдены с помощью применявшихся выше функций и тех же приемов. Результаты вычислений показаны на рис. 3, б, из которого получается следующее соотношение:

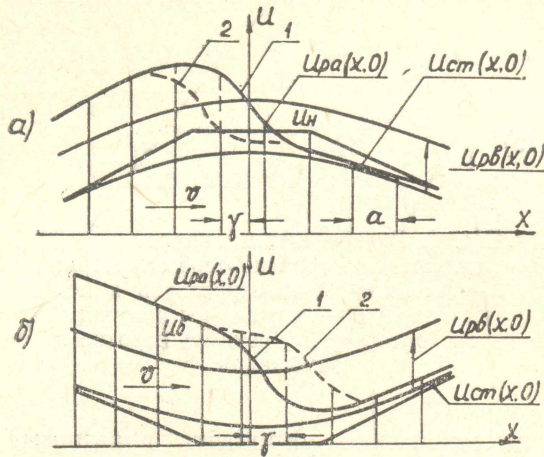


Рис. 3. Потенциалы транспортеров в зоне высоковольтного индуктора (а) и в зоне низковольтного индуктора (б):
1 — перед коммутацией,
2 — после снятия заряда

$$U_b = U_{pb}(-0,5a, 0) + U_{ct}(-\gamma, 0) - U_{ct}(-\gamma, \pm a) + U_{pa}(-0,5a, 0). \quad (5)$$

Решая совместно уравнения (4) и (5), можно получить

$$U_{pa}(-0,5a, 0) = q_a N(-0,5a, 0, a, d, n, r, \epsilon_0, \epsilon_1) = 0,5 U_b - [U_{ct}(-\gamma, \pm d) - U_{ct}(-\gamma, 0)]. \quad (6)$$

В теории электростатических генераторов широко используется формула, по которой определяется нагрузочный ток [1, 3],

$$I_n = (q - q') k m n_0 = 2q_a k m n_0, \quad (7)$$

где m — число транспортеров в роторе,
 k — число пар полюсов,
 n_0 — число оборотов ротора в сек.

Найдем заряд q_a из формулы (6), подставим его в последнее уравнение и получим в общем виде уравнение линейной части внешней характеристики электростатического генератора

$$I_n = \frac{2k m n_0 \{0,5 U_b - [U_{ct}(-\gamma, \pm d) - U_{ct}(-\gamma, 0)]\}}{N(-0,5a, 0, a, d, n, r, \epsilon_0, \epsilon_1)}. \quad (8)$$

Нами были произведены приближенные аналитические расчеты потенциальных функций статора и ротора. С их помощью на основе изложенного метода был получен один из вариантов уравнения характеристики для ЭСГ, приведенный ниже.

$$I_n = \frac{\epsilon_1 l 4 n^3 z n_0 k^2 [92 + 260 n^2 + 325 c (d^2 - n^2)]}{(3n^2 - r^2)(1 - 0,5a) [1 - (1 - 0,5a)^{12}] [13 - (1 - 0,5a)^{12}]} \times \left\{ \frac{U_b}{n^2 + c (d^2 - n^2)} + \frac{8 U_n \sqrt{1 - b^2} (8b^4 - b^2 - 7)}{5\pi (1 - b) [4 + 4n^2 + 5c (d^2 - n^2)]} \right\}, \quad (9)$$

где

$$c = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0},$$

z — осевая длина транспортера,

l — половина расстояния по статору между высоковольтными и низковольтными индукторами.

Все геометрические размеры здесь отнесены к l .

Легко заметить, что уравнение (9) превращается в аналитическое выражение характеристики короткого замыкания, если положить $U_n = 0$.

Приравняв нулю правую часть равенства, можно получить коэффициент усиления напряжения ЭСГ, который понимают как отношение выходного напряжения в режиме холостого хода к напряжению возбуждения.

Формула пригодна и для вычисления внешней характеристики генератора, работающего по индукционной схеме возбуждения. Для такой машины в (9) следует заменить U_n на $(U_n + U_v)$.

Характеристики, вычисленные по вышеприведенному уравнению, сравнивались с экспериментальными характеристиками трех опытных образцов ЭСГ различных конструкций. Погрешности не превышают 10%, что можно полагать приемлемым в инженерных расчетах. Более точные аналитические расчеты электрических полей, возможно, позволят найти и более удачные формулы внешних характеристик, однако и приведенная нами может быть полезной лицам, занимающимся конструированием электростатических машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Ляпин, В. И. Левитов. Электростатические генераторы с жестким ротором, ч. I. ЦИНТИэлектропром, М., 1963.
2. А. П. Кононов, В. А. Лукутин, В. М. Осипов. Приближенный метод расчета поля электростатического генератора. Изв. ТПИ, т. 191, 1969.
3. В. А. Лукутин, В. Д. Эськов. К расчету электростатических генераторов с каскадным соединением транспортеров-проводников. «Энергетика и транспорт», № 2, 1967.