ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 244 1972

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЕМКОСТНОГО ГЕНЕРАТОРА

В. А. ЛУКУТИН, Э. Д. МОГИЛЕВСКАЯ

(Представлена научным семинаром каф. ТОЭ)

Емкостный генератор постоянного тока является высоковольтным аппаратом и для его надежной работы нужно обеспечить высокую электрическую прочность всех узлов этой машины. Электрическая прочность тех или иных элементов конструкции определяется не только качеством диэлектриков, из которых они изготовлены, но и напряженностями электрического поля во всех участках этих элементов. При конструировании машин следует принимать ряд мер для создания наиболее равномерного распределения градиентов потенциала и их снижения в тех зонах, где электрическая прочность среды наименьшая.

Для исследования влияния конструктивных особенностей генераторов на величину напряженности поля в зонах с наименьшей электрической прочностью, а также изучения зависимости этих напряженностей от режима работы машины необходим соответствующий математический аппарат, позволяющий решить поставленную задачу.

В данной статье предлагаются приближенные аналитические функции, с помощью которых легко определяются напряженности электрического поля в рабочем пространстве генератора.

В ряде работ [1, 2] были произведены приближенные аналитические расчеты электрического поля машины на основе принципа наложения и с применением вариационного метода Ритца.

Ограничимся здесь рассмотрением поля лишь в зазоре ротор-статор, где электрическая прочность среды наименьшая. Потенциальная функция для этой области была найдена [1, 2] в виде суммы составляющих от зарядов статора и ротора. Ниже будем определять отдельно проекцию вектора напряженности электрического поля на поверхность ротора (касательная проекция E_x) и проекцию, перпендикулярную этой поверхности (нормальная составляющая E_y). Для их вычисления продифференцируем потенциальную функцию для зазора соответственно по x и y.

$$E_y(x, y) = -\frac{\partial U_0(x, y)}{\partial y} = -\frac{\partial U_{co}}{\partial y} - \frac{\partial U_{pao}}{\partial y} - \frac{\partial U_{pbo}}{\partial y} = \\ = E_{yc} + E_{ypa} + E_{yrb}. \quad (1)$$

Индексами помечены составляющие от зарядов статора и ротора, а $U_0(x, y)$ — потенциальная функция для области зазора ротор-статор. В (1) входят следующие функции:

$$E_{yc}(x, y) = U_{н}\frac{0{,}25\varepsilon_1 y}{\varepsilon_0 1638 l\Delta}[F(1-x^2)^2 + L(1-x^2)^8], \quad (2)$$

$$E_{\text{ура}}(x,y) = y\,\frac{\{U_{\text{в}} + U_{\text{н}}\kappa_1(m+n^2)(F+L)\}\{M[1-(x\mp 1)^4] + \text{N}[1-(x\mp 1)^{12}]\}}{(m+n^2)\{M[1-(1-a)^4] + L[1-(1-a)^{12}]\}l}, \quad (3)$$

$$E_{\text{урб}} = \frac{U_{\text{в}}\varepsilon_1}{2[\varepsilon_1(d-n) + \varepsilon_0(n-r)]l}. \quad (4)$$

Последние уравнения справедливы для области $n \leqslant |y| \leqslant d$ $-1 \leqslant x \leqslant 1$.

Учитывая симметрию поля, координатная ось x направлена по осям транспортеров в сторону вращения ротора, а ось y — перпендикулярна поверхности ротора и проходит через середину высоковольтного индуктора.

В формулах (2, 3, 4) приняты следующие обозначения:

$$F = 34{,}3(88n^2 + 25 + 110m)(7\text{Д}_2 + 6\text{Д}_4) - \\ - 2{,}96(112n^2 + 75 + 140m)(19\text{Д}_2 + 6\text{Д}_4);$$

$$L = 100(24n^2 + 20 + 5m)(19\text{Д}_2 + 6\text{Д}_4) - \\ - 14{,}32(112n^2 + 75 + 140m)(7\text{Д}_2 + 6\text{Д}_4);$$

$$\Delta = 16{,}45n^4 + 18{,}1n^2 + 3{,}62 + 4{,}9m(4{,}62n^2 + 3{,}54) + 2{,}6m^2;$$

$$M = (260n^2 + 92 + 325m)[5 - (1-a)^4] - \\ - 5{,}77(8{,}84n^2 + 5{,}4 + 11{,}05m)[13 - (1-a)^{12}];$$

$$N = (36{,}5n^2 + 28{,}4 + 45{,}6m)[13 - (1-a)^{12}] - \\ - 15(8{,}84n^2 + 5{,}4 + 11{,}05m)[5 - (1-a)^4];$$

$$K_1 = \frac{0{,}25\varepsilon_1}{\varepsilon_0 1638\Delta}, \qquad m = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}(d^2 - n^2).$$

Перечисленные коэффициенты зависят только от размеров машины и свойств диэлектриков, из которых она выполнена. Эти размеры, а также координаты x, y, взяты отнесенными к размеру l, равному расстоянию между серединами соседних низковольтного и высоковольтного индукторов. В формулах обозначено:

$2d$ — расстояние между статорными поверхностями;
$2n$ — толщина ротора;
$2b$ — ширина индуктора;
$2r$ — диаметр транспортеров;
$2a$ — расстояние между осями соседних транспортеров;
ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды в зазоре ротор-статор;
ε_1 — абсолютная проницаемость диэлектрика ротора.

Теперь, продифференцировав ту же потенциальную функцию по x, запишем уравнение для касательной составляющей напряженности электрического поля в зазоре.

$$E_{\text{x}}(x, y) = -\frac{\partial U_0(x, y)}{\partial x} = -\frac{\partial U_{\text{со}}}{\partial x} - \frac{\partial U_{\text{рао}}}{\partial x} = E_{\text{хс}} + E_{\text{хра}}; \quad (5)$$

$$E_{\text{хс}}(x, y) = U_{\text{н}}(\text{D}_2 x + 2\text{D}_4 x^3) + \\ U_{\text{н}}\kappa_1(d^2 - y^2)[F2x(1-x^2) + L8x(1-x^2)^7]; \quad (6)$$

$$E_{\text{хра}}(x, y) = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}(d^2 - y^2)\cdot\left[\frac{U_{\text{в}}}{2(m+n^2)\{M[1-(1-a)^4] + N[1-(1-a)^{12}]\}} + \right. \quad (7)$$

$$\left. + \frac{U_{\text{н}}\kappa_1(m+n^2)(\text{F}+L)}{2(m+n^2)\{M[1-(1-a)^4 + N[1-(1-a)^{12}]\}}\right][4M(x-1)^3 + 12N(x-1)^{11}].$$

Здесь $f_c = \frac{U_н}{2}(D_0 + D_2x^2 + D_4x^4)$ — приближенная, аппроксимирующая распределение потенциала вдоль статорной поверхности, функция.

Анализ формул для напряженностей поля показывает, что составляющие, входящие в эти формулы, определяются как геометрическими параметрами машины, так и режимом ее работы. Так, нормальная составляющая имеет слагаемое $E_{урб}$, которое пропорционально напряжению возбуждения, а $E_{ус}$ — определяется напряжением нагрузки. Третье слагаемое имеет более сложную зависимость от обоих напряжений и при $U_н = U_{хх}$ обращается в нуль.

На рис. 1 представлены графики распределения нормальных составляющих напряженности электрического поля по поверхности ротора $y=n$ в зоне высоковольтного индуктора. Они рассчитаны по формулам (2), (3), (4) для конкретного режима $U_н=100$ *кв*, $U_в=10$ *кв* генератора с относительными размерами $d=0{,}067$, $n=0{,}06$, $r=0{,}0033$, $\varepsilon_1=4\ \varepsilon_0$, $l=15$ *см*. Для точек с отрицательными ординатами x в формуле (3) следует брать нижние знаки.

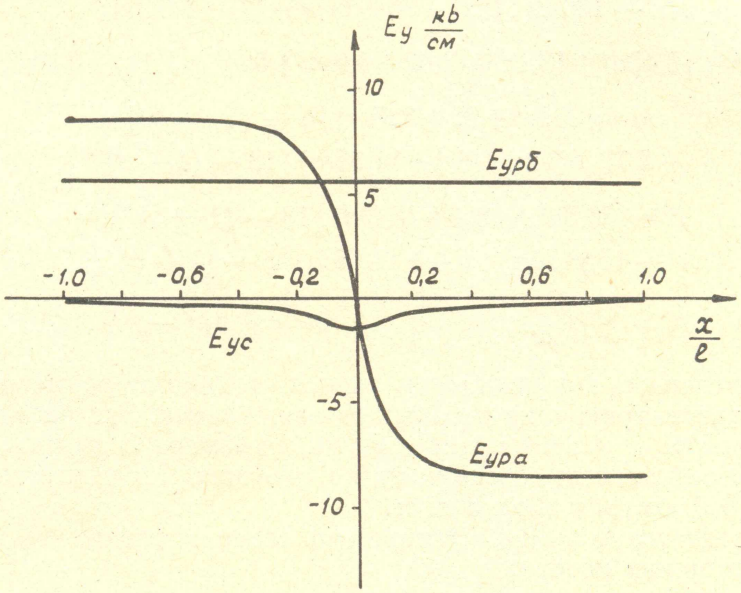

Рис. 1

Для другого режима машины соответственно изменятся соотношения между отдельными составляющими напряженности, но характер кривых сохранится.

Если генератор будет иметь другие размеры, то, кроме изменения своей величины, составляющие еще могут изменить крутизну.

Касательные составляющие напряженности электрического поля на поверхности ротора в той же зоне и для того же генератора определены по формулам (6), (7) и построены на рис. 2 сплошными линиями. Как и в предыдущем случае, напряженность зависит от режима работы и от геометрических размеров машины. Если просуммировать E_{xp} и E_{xc}, то результирующая кривая будет иметь весьма сложную форму и на ней можно заметить несколько экстремальных точек. Участки роторной поверхности с максимальными напряженностями определяются режимом работы генератора и при его изменении будут перемещаться. Так, судя по рис. 2, касательная составляющая напряженности будет наибольшей и примерно одинаковой непосредственно под индуктором и в средней части поверхности ротора между индукторами.

На этом же рисунке пунктирными линиями представлены соответствующие графики напряженностей, полученные на модели рассматриваемого генератора в электролитической ванне. Характер кривых и их абсолютные величины получились очень похожими, что свидетельствует о приемлемой достоверности предлагаемых формул.

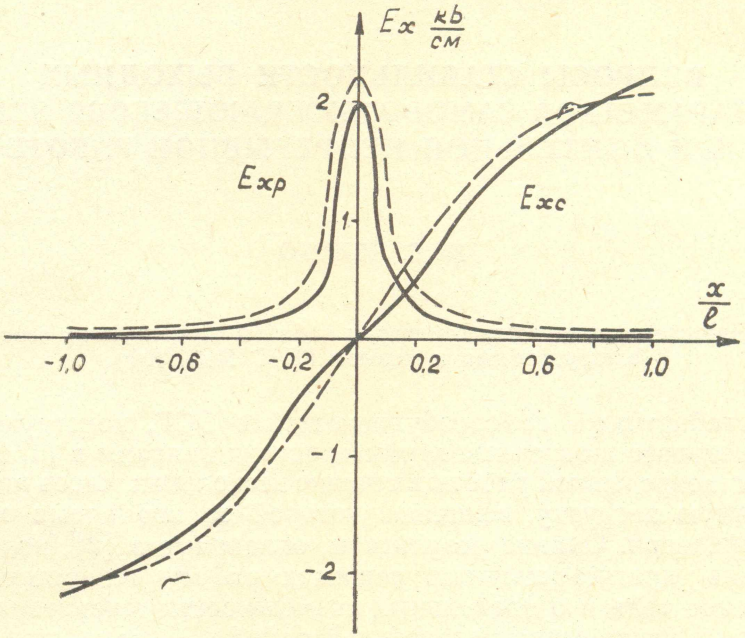

Рис. 2

К сказанному добавим, что $E_{ус}$ и $E_{хс}$ в значительной мере определяются формой кривой распределения потенциалов на статорной поверхности, а конкретнее, аппроксимирующим это распределение полиномом f_c.

В заключение можно сделать вывод, что на основе вариационного метода расчета электрического поля можно получить весьма простые и удобные для практического применения в инженерной практике аналитические формулы для исследования напряженности электрического поля в зазоре ротор-статор емкостного генератора постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *А. П. Кононов, В. А. Лукутин, В. М. Осипов.* Приближенный метод расчета поля электростатического генератора. Изв. ТПИ, т. 191, 1969.

2. *В. А. Лукутин, Э. Д. Могилевская.* Приближенный аналитический расчет электрического поля ротора емкостного генератора. Изв. ТПИ, т. 210, 1971.