

## РАСЧЕТ РАБОЧЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ УНИПОЛЯРНОГО ЕМКОСТНОГО ГЕНЕРАТОРА (УЕГ)

А. И. Бертинов, Б. А. Пономарев

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Аналитический расчет напряженности результирующего электрического поля в рабочем зазоре униполярных емкостных генераторов из-за наличия высших гармоник представляет сложную задачу. В ее практическом изучении делаются лишь первые шаги, а опубликованные теоретические работы в этой области малочисленны и противоречивы.

Так, в [1] отстаивается точка зрения, согласно которой в униполярном емкостном генераторе с заземленной системой электродов (УЕГЗ) без коммутации наибольшее возможное напряжение в рабочем зазоре, определяющее максимальную величину средней напряженности поля, равно напряжению возбуждения. В [2] получено выражение для напряжения УЕГЗ, свидетельствующее о его знакопеременном характере. Это же подтверждает приведенное в [3] эмпирическое соотношение, связывающее напряженность поля с выходным напряжением и напряжением возбуждения униполярного емкостного генератора; однако без учета влияния формы кривой напряжения и схемы включения полюсов, эта формула не получила в работе экспериментального обоснования и для расчета напряженности поля УЕГЗ оказалась неприемлемой.

В данной работе излагаются результаты графоаналитических исследований, касающихся оценки среднего значения напряженности электрического поля в рабочем зазоре многополюсных синхронных УЕГЗ дискового типа с транспортерами-проводниками.

Поле в рабочем зазоре емкостного генератора в данный момент движения ротора может быть определено, если будут известны потенциалы систем рабочих полудисков. Принятая схема включения полюсов УЕГЗ такова, что ротор (R) в течение всего рабочего цикла находится под постоянным потенциалом возбуждения, а одна из систем полудисков ( $S_1$ ) заземлена. Переменным является лишь потенциал другой системы полудисков статора ( $S_2$ ), соединенной с нагрузкой.

Фиксирование положения статорных полудисков относительно движущегося ротора в процессе работы может быть осуществлено путем одновременного осциллографирования переменного потенциала статора и сигнала датчика положения ротора. В качестве последнего используется устройство, чувствительным элементом которого служит фотоэлемент: световой поток, падающий на фотоспротивление от специального источника света, периодически перекрывается дисковой диафрагмой со щелями, обеспечивающими всплеск напряжения сигнала в момент совпадения осей полюсов ротора и полюсов заземленной системы полудисков статора.

Исследуемый емкостной генератор имеет  $m=15$  дисков ротора и  $2p=36$  полюсов, ограниченных диаметрами  $D_1=250$  мм и  $D_2=90$  мм, что обеспечивает близкий к синусоидальному характер изменения его рабочей емкости.

На основании осциллограмм, снятых для нескольких режимов активной нагрузки, на рис. 1 в определенном масштабе построены кривые выходного напряжения генератора, где за начальный момент отсчета принят момент всплеска сигнала датчика положения ротора, поступающего на вход электронного осциллографа через переключатель входа сигнала — поляризованное реле.

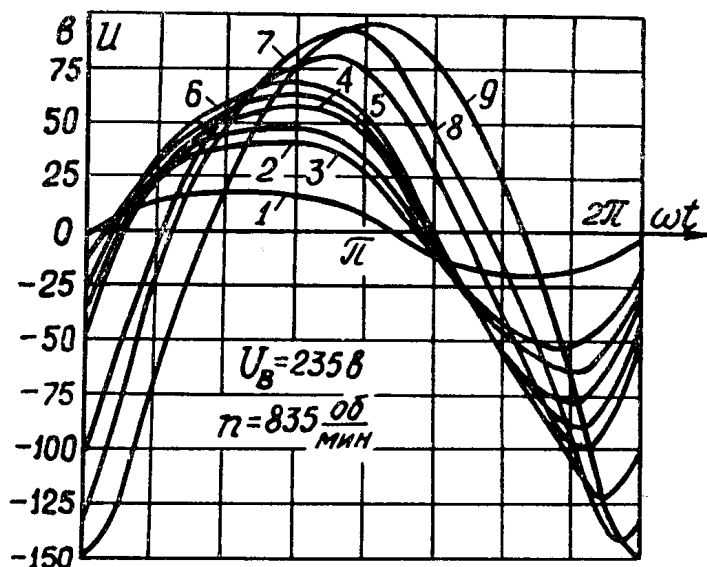


Рис. 1. Кривые выходного напряжения УЕГЗ для различных режимов активной нагрузки

Как видно из приведенных графиков, форма кривой выходного напряжения УЕГЗ существенно меняется с изменением нагрузки: в режиме, близком к короткому замыканию (кривая 1), она напоминает синусоиду, которая все более искажается по мере приближения к холостому ходу — отрицательный полупериод заостряется, сокращается по длительности и в большей мере, чем положительная полуволна, увеличивается по амплитуде. С другой стороны, кривая напряжения по мере удаления от режима короткого замыкания все более отстает по фазе на некоторый угол от поля возбуждения, жестко связанного с ротором. Этот угол аналогичен углу  $\theta$  в синхронном электромагнитном генераторе.

Максимальную напряженность поля в зазоре емкостного генератора следует, очевидно, ожидать при наличии потенциала системы изолированных полудисков статора, противоположного по знаку потенциалу возбуждения. Тот факт, что отрицательный максимум выходного напряжения для рассматриваемых режимов работы имеет место в различные моменты движения ротора, оказывает прямое влияние на распределение полей в зазоре синхронного УЕГЗ. Действительно, как показывает анализ сечения полюсов в активной зоне генератора, в указанные моменты времени расстояние между роторными полюсами и изолированными полюсами статора не остается постоянным. Следовательно, максимальное значение средней напряженности поля, зависящей не только от величины разнополярных потенциалов полюсов, но и от их взаимного положения, для каждого режима работы будет также иметь место в различные

моменты рабочего цикла, в общем случае не соответствующие моменту появления отрицательного максимума выходного напряжения.

При наличии отрицательной полуволны напряжения выражение для средней напряженности результирующего поля в зазоре УЕГЗ можно представить в виде

$$E = \frac{U_{RS_2}}{\delta} = \frac{U_B}{\delta} + \frac{u}{\delta}, \quad (1)$$

где

$U_{RS_2}$  — разность потенциалов полюсов ротора R и статора  $S_2$ ;

$\delta$  — кратчайшее расстояние между ними;

$E_B = \frac{U_B}{\delta}$  — составляющая результирующей напряженности от поля возбуждения;

$U_B$  — напряжение возбуждения;

$E_H = \frac{u}{\delta}$  — составляющая результирующей напряженности от поля нагрузки;

$u$  — абсолютная величина потенциала изолированного полюса статора в рассматриваемый момент.

Величина  $\delta$  зависит от геометрии полюсов и величины рабочего зазора емкостного генератора. Идеальный профиль полюсов, отвечающий условиям параметрических уравнений для максимальных сил по всей поверхности полюсов, в многополюсных многодисковых конструкциях практически трудно выполним. Профиль полюсов исследуемого генератора близок к полуокружности, радиус которой равен минимальному рабочему зазору  $\delta_0$ .

Введя коэффициент рабочего зазора

$$k_\delta = \delta/\delta_0 \quad (2)$$

и коэффициент напряжения

$$k_u = u/U_H, \quad (3)$$

где  $U_H$  — действующее значение выходного напряжения, выражение (1) перепишем в виде

$$E = E_B + E_H = \frac{U_B}{k_\delta \delta_0} + \frac{k_u U_H}{k_\delta \delta_0}. \quad (4)$$

Исследуя зависимости  $k_\delta(\omega t)$  и  $k_u(\omega t)$  в те моменты рабочего цикла, когда выходное напряжение генератора проходит через отрицательный максимум, было установлено, что с увеличением нагрузки напряженность поля, рассчитанная по (4), сначала растет, но затем, достигнув некоторого максимального значения, начинает уменьшаться. Причем наибольшее значение напряженности поля имеет место в режиме работы, близком к режиму максимальной мощности, которому соответствует кривая б выходного напряжения генератора (рис. 1).

К аналогичным выводам приводит моделирование картины электрического поля в зазоре УЕГЗ на участке двойного полюсного деления для нескольких характерных положений ротора и режимов работы генератора, проведенного на основании снятых осциллограмм напряжения. Поскольку в сечении указанной активной зоны генератора поле с достаточной степенью точности можно принять плоскопараллельным, был использован способ моделирования на электропроводной бумаге.

Для этого из электропроводной бумаги в определенном масштабе вырезалась повторяющаяся область рабочего зазора, соответствующая рассматриваемому моменту движения ротора. Затем к соответствующим участкам полученной модели посредством металлических шин подводились определенные потенциалы, после чего по известной методике [4] с помощью мостовой схемы на постоянном токе производились графические построения силовых изопотенциальных линий. Так как в дисковых машинах ширина полюсов по их длине не постоянна, за основу было взято сечение, соответствующее равновеликим площадям полюсов.

Одна из картин поля, снятая для режима максимальной мощности в положении ротора, соответствующем углу  $\alpha = \frac{\pi}{4}$ , приведена на рис. 2. Результаты моделирования подтвердили полученную закономерность изменения напряженности поля в зазоре синхронного УЕГЗ, что позволяет ее обобщить на другие конструкции многополюсных машин этого типа, для которых характерно синусоидальное изменение рабочей взаимоемкости.

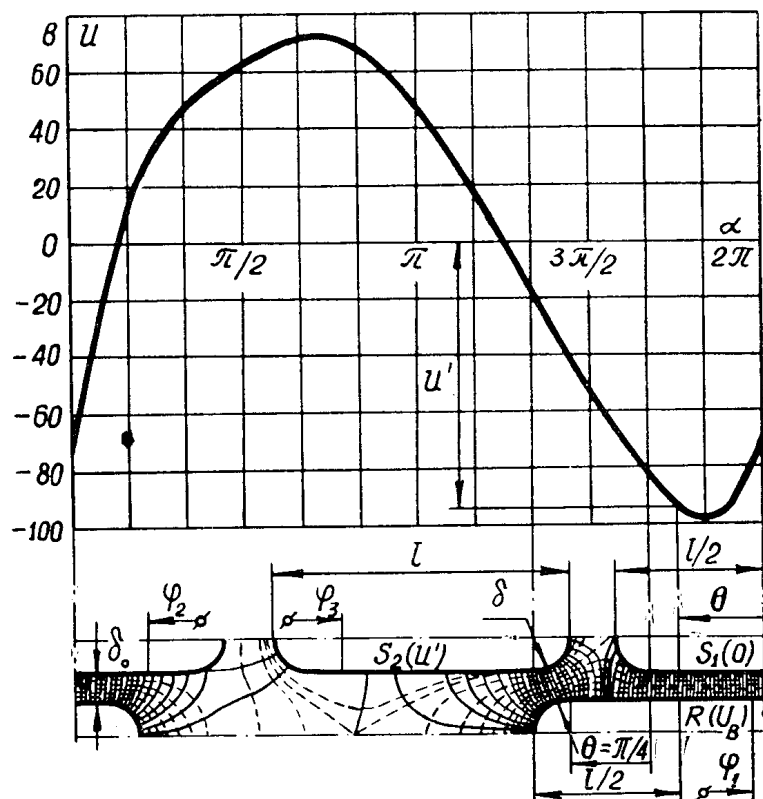


Рис. 2. Картина электрического поля, построенная в соответствии со снятой осциллограммой напряжения для режима максимальной мощности УЕГЗ

На рис. 3 построены зависимости коэффициентов напряжения  $k_{um}$  и зазора  $k_{\delta m}$ , соответствующих максимуму напряженности поля в зазоре

$$E_m = \frac{U_B + k_{um} U_H}{k_{\delta m} \delta_0}, \quad (5)$$

от напряжения нагрузки в относительных единицах

$$\dot{U} = U_H^* U_{XX}, \quad (6)$$

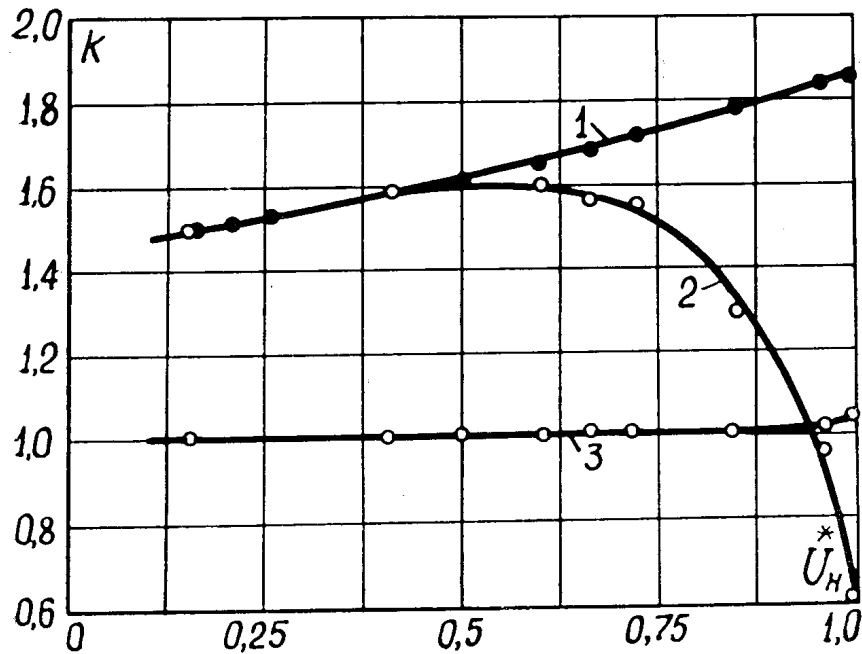


Рис. 3. К расчету максимальной величины среднего значения напряженности поля в зазоре УЕГЗ

где

$U_{xx}$  — действующее значение напряжения холостого хода.

Для сравнения здесь же показана зависимость от величины  $\dot{U}_H^*$  коэффициента амплитуды выходного напряжения

$$k_a = U_{nm}/U_H, \quad (7)$$

где

$U_{nm}$  — абсолютное значение отрицательной амплитуды выходного напряжения.

Видим, что при малых нагрузках графики функций  $k_{um}(\dot{U}_H^*)$  и  $k_a(\dot{U}_H^*)$  совмещены (кривые 1 и 2, рис. 3), т. е. максимум напряженности поля совпадает с моментом появления отрицательной амплитуды выходного напряжения. При последующем увеличении нагрузки, несмотря на рост отрицательной амплитуды выходного напряжения (коэффициент амплитуды непрерывно увеличивается), происходит ослабление поля, так как коэффициент зазора при этом растет незначительно (кривая 3, рис. 3), в то время как коэффициент напряженности резко падает (кривая 2).

### Выводы

1. Напряжение на выходе синхронного УЕГЗ имеет знакопеременный характер.

2. В режиме, близком к короткому замыканию, когда влияние высших гармоник незначительно, кривая выходного напряжения УЕГЗ близка по форме к кривой изменения рабочей взаимоемкости и все более искажается с увеличением реакции якоря по мере приближения к холостому ходу.

3. С увеличением нагрузки угол между началом цикла изменения рабочей взаимоемкости (или, что все равно, цикла изменения тока короткого замыкания) и началом изменения выходного напряжения  $\Theta \rightarrow 90^\circ$  эл.

4. Зависимость между максимальной величиной средней напряженности поля в рабочем зазоре синхронного УЕГЗ и нагрузкой нелинейна.

5. Рабочая напряженность поля многополюсного синхронного УЕГЗ может быть рассчитана с помощью предлагаемых экспериментальных коэффициентов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Левитов, А. Г. Ляпин. Электростатические генераторы с жестким ротором. ЦИНТИ приборэлектропром, М., 1963.

2. Л. С. Полотовский. Емкостные машины постоянного тока высокого напряжения. М., ГЭИ, 1960.

3. Э. А. Лодочников, В. П. Лукьянчук, В. А. Куфа. Факторы, определяющие удельную мощность емкостных генераторов. «Электротехника», 1964, № 11.

4. Г. А. Рязанов. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля. «Наука», М., 1966.

---