

# ОЦЕНКА РАСЧЕТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

<sup>1</sup> Салынов С.А., <sup>2</sup> Горяев В.М.

<sup>1</sup>Калмыцкий Государственный университет имени Б.Б.Городовикова, e-mail: sanalsaln@yandex.ru;

<sup>2</sup>Калмыцкий Государственный университет имени Б.Б.Городовикова, e-mail: it-ksu@yandex.ru

Настоящая статья посвящена расчёту синхронных генераторов. Представлен пример вычисления значений для номинальных параметров и магнитной цепи. Были проведены практические расчёты на базе программного кода на языке C#, которые позволили решить задачу для расчёта синхронного генератора общепромышленного применения.

---

**Ключевые слова:** синхронный генератор, КПД, электрические машины, , программирование, ярмо ротора, обмотка возбуждения, индукция.

## Введение

Электричество - важная часть повседневной жизни, от освещения домов и зданий. В то время как люди полагаются на основную электрическую сеть, это может иногда не сработать, из-за сбоев на электростанции. Есть также очень отдаленные места куда провести электричество невозможно. В таких случаях необходим генератор постоянного или генератор переменного тока.

Электрические машины (ЭМ) бывают двух типов постоянного и переменного тока. ЭМ применяются в качестве генераторов или электродвигателей.

Электродвигателя преобразуют электрическую энергию в механическую, а генераторы выполняют инверсную операцию: механическую энергию преобразуют в электрическую, используя принцип магнитной индукции. Этот принцип объясняется следующим образом: всякий раз, когда проводник перемещается внутри магнитного поля таким образом, что проводник пересекает магнитные линии потока, напряжение возникает в проводнике. Количество генерируемого напряжения зависит от силы магнитного поля, угла при котором проводник разрезает магнитное поле, скорость перемещения проводника и длина проводника в магнитном поле. Полярность напряжения зависит от направления магнитных линий потока и направление движения проводника. Из школьного курса физики известно, что для определения направление тока используется, правило левой руки. Т.е. если протянуть большой, указательный и средний палец левой руки под прямым углом друг к другу и направить большой палец в направлении перемещения проводника, а указательный палец в направлении магнитного потока (с севера на юг). Тогда средний палец укажет направление тока в внешней цепи, к которой применяется напряжение.

## Расчёт синхронного генератора

### Исходные данные

Зазор м/у трубой и стенкой - Номинальная мощность  $P_n = 480$  кВт.

Диаметр скважины - Номинальное линейное напряжение  $U_n = 230$  В.

Диаметр труб - Номинальная частота вращения  $n_n = 500$  мин<sup>-1</sup>.

Масса одной трубы - Частота  $f = 50$  Гц.

Частота вращения снаряда - Коэффициент мощности  $\cos\varphi_n = 0,8$ .

Глубина скважины - Число фаз  $m = 3$ .

Охлаждение – воздушное, самовентилирующей.

### Расчёт номинальных параметров

Угол наклона скважины - Номинальное фазное напряжение (при соединении обмотки статора в звезду Y)

$$U_{\text{нф}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 133 \text{ В.}$$

Номинальная полная мощность

$$S_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\cos\varphi_n} = \frac{480 \cdot 10^3}{0,8} = 600 \cdot 10^3 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

Номинальный фазный ток

$$I_{\text{нф}} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} = \frac{600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 230} = 1510 \text{ А.}$$

Число пар полюсов

$$p = \frac{60f}{n_n} = \frac{60 \cdot 50}{500} = 6.$$

Расчётная мощность

$$S'_n = k_E S_n = 1,08 \cdot 600 \cdot 10^3 = 648 \cdot 10^3 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

где  $k_E$  – отношение ЭДС обмотки якоря при номинальной нагрузке  $E_n$  к номинальному напряжению  $U_n$ , предварительно принимают  $k_E \approx 1,08$ ;

### Определение потерь и КПД

Основные электрические потери в обмотке статора

$$P_{\text{эл}} = m I_{\text{нф}}^2 r_1 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 1510^2 \cdot 1,33 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} = 9,1 \text{ кВт.}$$

m- число фаз (нач. условия)

$I_{\text{нф}}$  – нач. условия,

$r_{1*}$  - вектор падения напряжения/ В крупных машинах  $I r_1$  относительно мало и им можно пренебречь.

Пределы изменения параметров и постоянных времени для реальных современных синхронных машин общего назначения приведены соответственно в табл.

Потери на возбуждение

$$P_{\text{в}} = (I_{\text{вн}}^2 r_{\text{в}(75)} + 2 \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{вн}}) \cdot 10^{-3} = \\ = (318,0^2 \cdot 0,163 + 2 \cdot 1 \cdot 318,0) \cdot 10^{-3} = 17,12 \text{ кВт.}$$

где  $\Delta U_{\text{щ}} = 1 \text{ В}$  – переходное падение напряжения в щеточном контакте.

Для питания обмотки возбуждения выбираем тиристорное возбуждательное устройство ТВУ-65-320 ( $U_{\text{ен}}=65 \text{ В}$ ,  $I_{\text{ен}}=320 \text{ А}$ ).

Сопротивления обмоток  $r_1$ , и  $r_{\text{в}}$  приводят к расчётной рабочей температуре:  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости  $A$ ,  $E$ ,  $B$  или  $115 \text{ }^\circ\text{C}$  для обмоток с изоляцией класса  $F$  и  $H$ .

Активное сопротивление обмотки возбуждения

$$r_{\text{в}130} = p_{130} \cdot \frac{2 p w_e l_{\text{exp}}}{q_e} = \frac{1}{39 \cdot 10^6} \cdot \frac{2 \cdot 6 \cdot 38 \cdot 1,02}{60 \cdot 10^{-6}} = 0,198 \text{ Ом},$$

$$r_{\text{в}75} = \frac{38 \cdot 0,198}{46} = 0,163 \text{ Ом.}$$

Магнитные потери в ярме статора

$$P_{a1} = k_{\text{да}} p_{1/50} B_a^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} m_{a1} \cdot 10^{-3} = 1,3 \cdot 1,4 \cdot 1,32^2 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 444 \cdot 10^{-3} = 1,41 \text{ кВт. где } p_{1/50} = 1,4$$

Вт/кг – удельные потери при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц для электротехнической стали марки 1512;  $k_{\text{да}} = 1,3$ ;

$B_a, B_{z1/3}$  – индукция в ярме статора и на высоте 1/3 зубца статора при  $E=U_{\text{нф}}$ .

$f$  – начальные условия.

Магнитные потери в зубцах статора

$$P_{z1} = k_{\text{дз}} p_{1/50} B_{z1/3}^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} m_{z1} \cdot 10^{-3} = \\ = 1,7 \cdot 1,4 \cdot 1,44^2 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 293 \cdot 10^{-3} = 1,45 \text{ кВт.}$$

где  $B_{Z1\frac{1}{3}} = 10,8 \cdot 10^{-3} E$ , Тл ,

$k_{\text{дз}} = 1,7$  – коэффициенты, учитывающие увеличение потерь из-за частичного замыкания листов стали вследствие заусенцев, а также изменения структуры стали при штамповке;

Механические потери

$$P_{\text{мех}} \approx 3,68 p \left(\frac{v_p}{40}\right)^3 \sqrt{l_1} = 3,68 \cdot 6 \cdot \left(\frac{24,2}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{0,342} = 2,86 \text{ кВт};$$

где  $V_p \approx \pi D n / 60$  – линейная скорость ротора, м/с.

$$v_p \approx \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,925 \cdot 500}{60} = 24,2 \text{ м/с.}$$

действительная длина статора

$$l_1 = 1,05 \cdot l_\delta = 1,05 \cdot 0,356 = 0,374 \text{ м.}$$

По табл. ближайший нормализованный внешний диаметр статора  $D_a = 1180 \text{ мм} = 1,18 \text{ м}$  (16-й габарит).

Высота оси вращения  $h = 0,63 \text{ м}$ .

Внутренний диаметр статора

$$D = \frac{D_a}{k_d} = \frac{1,18}{1,31} = 0,9 \text{ м.}$$

$n$ - номинальная частота вращения (нач. условия)

Поверхностные потери в полюсных наконечниках

$$P_{\text{пов}} = 0,5 \cdot 2 p \alpha t_1 k_0 \left(\frac{Z_1 n}{10000}\right)^{1,5} (B_0 t_1 \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 0,7 \cdot 0,242 \times \\ \times 0,342 \cdot 4,6 \cdot \left(\frac{90 \cdot 500}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,164 \cdot 0,0323 \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{-3} = 0,428 \text{ кВт},$$

где  $B_0 = B_{\delta 0} (k_{\delta 1} - 1) = 0,822 \cdot (1,2 - 1) = 0,164 \text{ Тл}$ .

$$\tau = \pi D / 2 p = \pi \cdot 0,925 / 12 = 0,242 \text{ м};$$

Действительная длина статора

$$n \cdot 11 - l_1 = 0,374 \frac{u'_n}{u_n} = 0,374 \frac{5,49}{6} = 0,342 \text{ м};$$

$k_0$  равно 4,6; 8,6 и 23,3 соответственно при полюсах из листов толщиной 1; 2 мм и при массивных полюсных наконечниках.

$Z_1$ - см. табл.

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 0,9}{90} = 0,0314 \text{ м.}$$

Добавочные потери при нагрузке

$$P_{\text{доб}} = 0,005 P_n = 0,005 \cdot 480 = 2,4 \text{ кВт.}$$

Номинальная мощность  $P_n$  (нач. условия)

Общие потери при номинальной нагрузке

$$\sum P = P_{\text{эл}} + P_{\text{в}} + P_{\text{ал}} + P_{\text{зл}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{пов}} + P_{\text{доб}} = \\ = 9,1 + 17,12 + 1,41 + 1,45 + 2,86 + 0,428 + 2,4 = 34,77 \text{ кВт.}$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_n + \sum P} = 1 - \frac{34,77}{480 + 34,77} = 0,932.$$

### Расчёт магнитной цепи

В данном разделе готовим расчётные выражения, необходимые для расчёта магнитной цепи (табл. ).

Для магнитопровода статора выбираем сталь 1511 толщиной 0,5 мм. Полюсы ротора выполняем из стали Ст3 толщиной 1 мм. Толщину обода (ярма ротора) принимаем  $h_j = 0,05$  м.

Расчёт числа проводников в пазу  $u_n$ , числа сегментов  $S_{ст}$ , хорды  $H$  и линейной нагрузки  $A$  сводим в табл.

Наилучший результат даёт 3-й вариант, который обеспечивает минимальные отходы при штамповке из стандартного листа размером 600×1500 мм.

Для расчетов была разработана программа на языке C#. Ниже фрагмент вывода третьей группы значений:

```
textBox24.Text = Environment.NewLine +
    "Основные электрические потери в обмотке статора Pэ1 = " + Pe1.ToString()
+ " Вт";
    textBox24.Text += Environment.NewLine + Environment.NewLine + "Потери на
возбуждение Pв=" + Pv.ToString() + " Вт";
    textBox24.Text += Environment.NewLine + Environment.NewLine + "Магнитные
потери в ярме статора Pa1=" + Pa1.ToString() + " Вт";
    textBox24.Text += Environment.NewLine + Environment.NewLine + "Магнитные
потери в зубцах статора Pz1=" + Pz1.ToString() + " Вт";
    textBox24.Text += Environment.NewLine + Environment.NewLine + "Механические
потери Pмех=" + Pmех.ToString() + " Вт";
    textBox24.Text += Environment.NewLine + Environment.NewLine + "Поверхностные
потери в полюсных наконечниках Pпов=" + Pпов.ToString() + " Вт";
    textBox24.Text += Environment.NewLine + Environment.NewLine + "Общие потери
при номинальной нагрузке Sum(P)=" + SumP.ToString() + " Вт";
    textBox24.Text += Environment.NewLine + Environment.NewLine + "Коэффициент
полезного действия КПД=" + КПД.ToString();
```

Скриншот программы для проектирования синхронных генераторов.

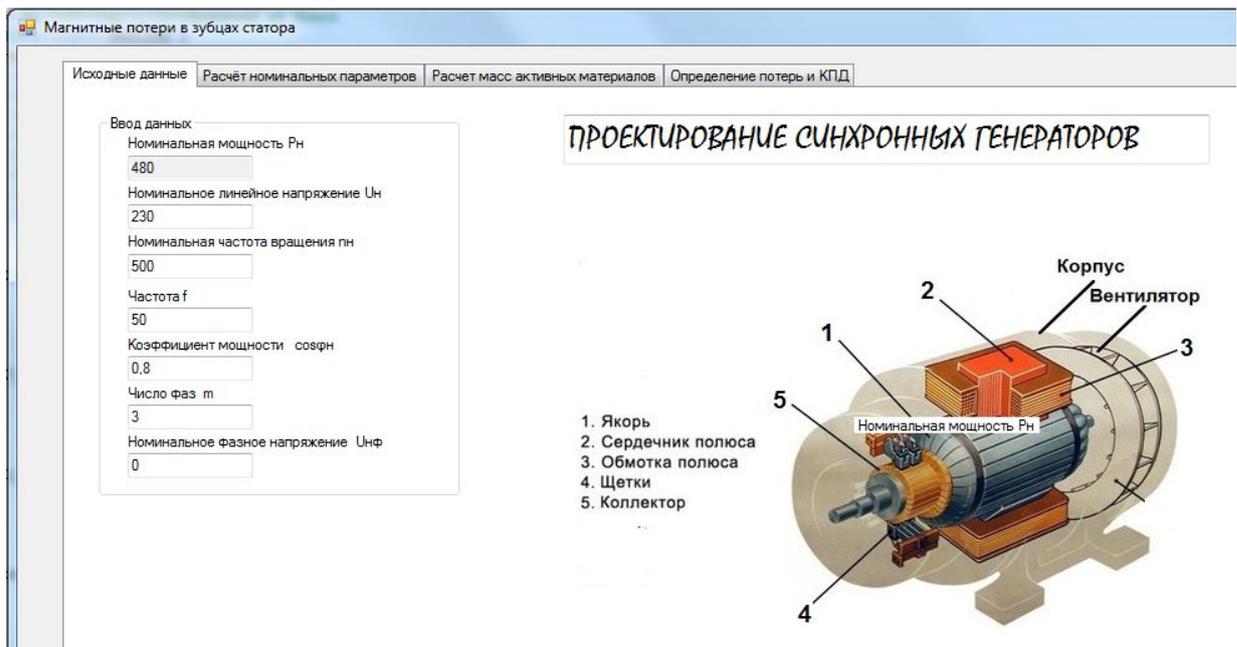


Рис.1. Программа расчёта для синхронного генератора

## **Заключение**

В ходе проделанных испытаний мы получили результаты. При давлении в 3 атмосферы безколлекторный генератор выдаёт напряжение приблизительно 1,5 В, мощность 1 А. Для того чтобы улучшить результаты есть несколько вариантов. Первый вариант- это использовать ниобиевые магниты. Второй вариант: увеличить количество полюсов и количество обмотки на статоре. Третий вариант: добавить вспомогательный генератор. Из перечисленных вариантов лучше всего подойдут для улучшения показаний генератора- это второй и третий вариант. Мы сможем увеличить количество полюсов с четырёх до восьми, при этом больше не позволит сама конструкция.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Вольдек А. И., Попов В. В. «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ» Питер, 2008
2. Забудский Е.И. «МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА» Москва 2009
3. Пахомин С.А. Проектирование синхронных генераторов: Учеб. пособие к курсовому проекту по электромеханике/ Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – 91с.
4. Ревич Юрий «Занимательная электроника» БХВ-Петербург, 2015