

В.В.Суханов  
СПГПУ, кафедра «Электрические машины»  
**Моделирование при помощи пакета ELCUT магнитных полей  
в явнополюсном синхронном генераторе при различных способах  
возбуждения магнитной системы машины**  
(Аннотация доклада)

**Вступительная часть**

Возбуждение магнитной системы со стороны ротора явнополюсного синхронного генератора принципиально возможно тремя способами. Это:

1. Традиционное электромагнитное возбуждение при помощи обычной обмотки возбуждения (ОВ), питаемой постоянным током.
2. Возбуждение с помощью постоянных магнитов (ПМ) с высокими энергетическими параметрами [магниты типа Sm-Co (самарий-кобальт) и Nd-Fe-B (неодим-железо-бор)].
3. Комбинированное возбуждение, когда на роторе имеется как обычная обмотка возбуждения, так и постоянные магниты.

Синхронные генераторы с традиционной системой возбуждения обладают хорошими регулировочными свойствами как при работе на сеть, так и на автономную нагрузку (например, регулировочные характеристики при постоянном  $\cos\varphi$  или при постоянной активной мощности  $P_a$ ). Однако применение обычных обмоток возбуждения в ряде случаев ограничивается электрическими и тепловыми нагрузками.

Использование для возбуждения высокоэнергетических постоянных магнитов позволяет избавиться от потерь на возбуждение и уменьшить габариты ротора, а, следовательно, и всей машины в целом. Вместе с тем, в генераторах с возбуждением от постоянных магнитов отсутствует возможность влиять на изменение основного потока, то есть машина становится нерегулируемой и в этом их недостаток.

При комбинированном возбуждении большая часть основного потока создается постоянными магнитами, а обычная обмотка с электромагнитным возбуждением имеет меньшую мощность - такую, чтобы создаваемый ею дополнительный поток составлял бы примерно  $\pm 10\%$  от потока постоянного магнита.

Основной целью нижеследующего доклада является демонстрация на примере конкретной машины возможностей программного комплекса ELCUT по расчету магнитных полей в синхронном генераторе при вышперечисленных способах возбуждения магнитной системы со стороны явнополюсного ротора.

Основные данные синхронного генератора:

1. Номинальная мощность -  $P_n = 800$  кВт;
2. Номинальное линейное напряжение -  $U_{лн} = 490$  В;
3. Номинальный фазный ток -  $I_{фн} = 1109$  А;
4. Число фаз -  $m = 3$ ;
5. Число пар полюсов -  $p = 3$ ;
6. Номинальная частота вращения -  $n_n = 1000$  об/мин;
7. Номинальный коэффициент мощности -  $\cos\varphi_n = 0,85$ ;
8. Номинальная частота -  $f_n = 50$  Гц;
9. Соединение фаз обмотки статора - звезда;

Определение основных размеров магнитной системы и электромагнитный расчет машины с вышеприведенными исходными данными выполнен на основе обычной инженерной методики расчетов, основанной на законе Ома для магнитной цепи. Полученная при этом геометрия магнитной системы в поперечном сечении машины показана на рис.1.

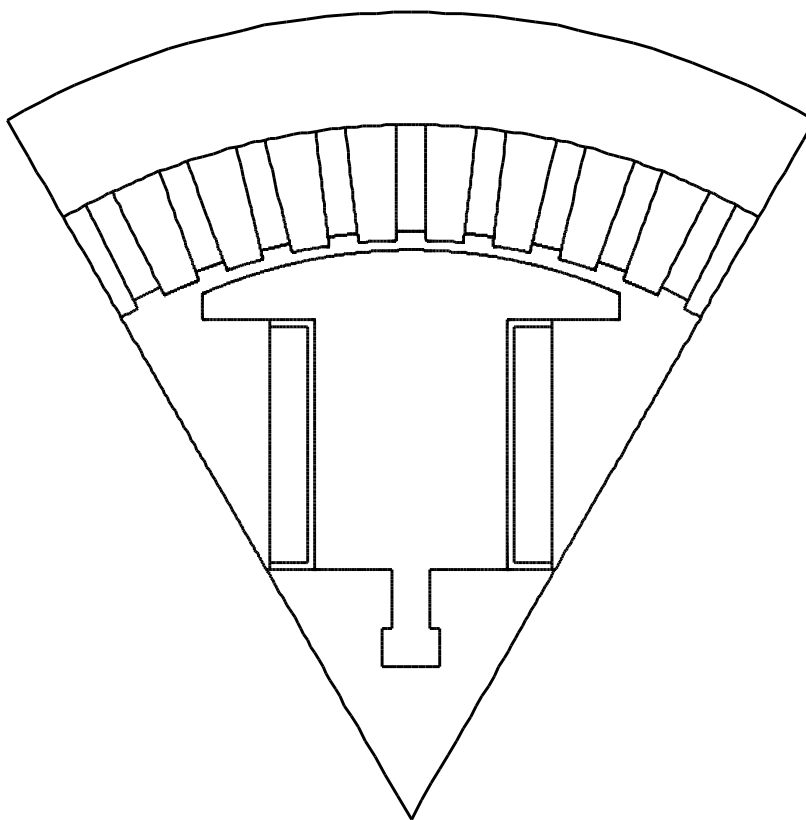


Рис.1. Геометрия магнитной системы на полюсном делении синхронного явнополюсного генератора. Ось d совпадает с осью паза.

В результате электромагнитного расчета было получено, что в режиме холостого хода номинальному потоку полюса в зазоре  $\Phi_{он}=0,111$  Вб (ось ординат на рис.2) от основной гармоники магнитной индукции поля возбуждения ротора соответствует номинальная намагничивающая сила (н.с.) на пару полюсов  $F_{он}=6672$  А (ось абсцисс на рис.2). При этом сама характеристика холостого хода (кривая намагничивания) выглядит так, как это показано на рис.2 в виде сплошной кривой (trace 1).

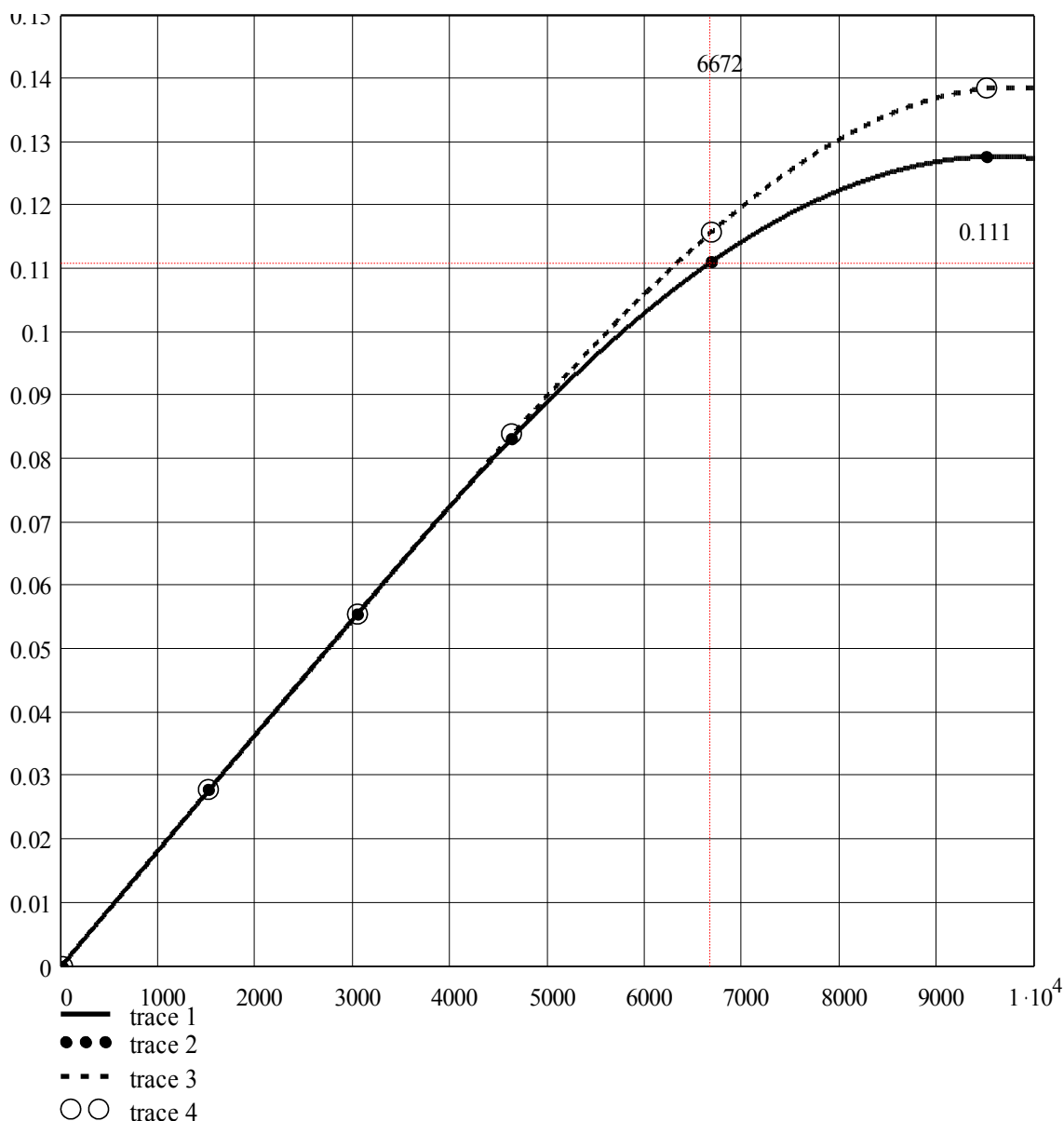


Рис.2. Характеристики холостого хода.

trace 1, trace 2- электромагнитный расчет;  
 trace 3, trace 4- моделирование при помощи Elcut.

Пунктирная кривая на рис.2 (trace 3) получена путем моделирования средствами программного комплекса Elcut для геометрической конфигурации магнитной системы, показанной на рис.1, и при тех же значениях намагничивающей силы обмотки возбуждения (trace 2 и trace 4).

Понятно, что результаты полевых расчетов (результаты моделирования) являются более точными, нежели результаты электромагнитного расчета, основанные на методе магнитных цепей. Так, из полевых расчетов величина основного потока при  $F_{\text{он}}=6672$  А оказалась несколько большей номинального значения ( $\Phi_0=0.116$  Вб  $>$   $\Phi_{\text{он}}=0.111$  Вб), в то время как из тех же полевых расчетов следует, что для создания того же номинального потока  $\Phi_{\text{он}}$  требуется меньшая намагничивающая сила ( $F_0=6300$  А  $<$   $F_{\text{он}}=6672$  А). Таким образом, результаты моделирования позволяют скорректировать номинальную величину намагничивающей силы обмотки возбуждения до значения  $F_{\text{он}}=6300$  А, которое необходимо для создания номинального потока  $\Phi_{\text{он}}=0,111$  Вб.

### **Основное содержание доклада**

Содержательную часть доклада по заявленной теме можно классифицировать следующим образом:

#### **Магнитные поля явнополюсного синхронного генератора при различных способах возбуждения магнитной системы машины со стороны ротора**

##### **I. Электромагнитное возбуждение (ЭМВ)**

(Вал ротора – ферромагнитный)

I.1. Магнитное поле ротора. Продольная ось ротора  $d$  совпадает с осью зубца статора.

I.2. Продольное магнитное поле якоря. Продольная ось ротора  $d$  совпадает с осью зубца статора.

III.3. Поперечное магнитное поле якоря. Продольная ось ротора  $d$  совпадает с осью паза статора.

##### **II. Магнитоэлектрическое возбуждение (МЭВ)**

(Вал ротора – немагнитный)

II.1. Магнитное поле ротора. Продольная ось ротора  $d$  совпадает с осью зубца статора.

II.2. Продольное магнитное поле якоря. Продольная ось ротора  $d$  совпадает с осью зубца статора.

II.3. Поперечное магнитное поле якоря. Продольная ось ротора  $d$  совпадает с осью паза статора.

### III. Комбинированное возбуждение (КВ)

(Вал ротора – немагнитный)

III.1. Магнитное поле ротора. Продольная ось ротора  $d$  совпадает с осью зубца статора. Обмотка возбуждения включена встречно по отношению к полю постоянного магнита.

III.2. Магнитное поле ротора. Продольная ось ротора  $d$  совпадает с осью зубца статора. Обмотка возбуждения обесточена.

III.3. Магнитное поле ротора. Продольная ось ротора  $d$  совпадает с осью зубца статора. Обмотка возбуждения включена согласно по отношению к полю постоянного магнита.

III.4. Продольное магнитное поле якоря. Продольная ось ротора  $d$  совпадает с осью зубца статора.

III.5. Поперечное магнитное поле якоря. Продольная ось ротора  $d$  совпадает с осью паза статора.

Для каждого пункта I.1-III.5 создана своя «папка» с соответствующим набором Elcut-файлов (файлы задачи, геометрии, физических свойств и результатов). Основные комментарии и пояснения ко всем задачам моделирования магнитных полей будут даны при непосредственном рассмотрении каждого конкретного варианта расчета. В нижеследующей таблице приведены лишь те результаты постпроцессорной обработки, которые касаются расчета амплитуды основной (первой) гармоники магнитной индукции на уровне середины минимального зазора.

Таблица

Способ возбуждения	ЭМВ	МЭВ	Комбинированное возбуждение $H_c=860$ кА/м	
			ОВ вкл. встречно	0.561
Амплитуда 1-ой гармоники магнитной индукции поля возбуждения ротора на уровне середины минимального зазора $B_{\delta m1o}$ (Т)	0.631	0.633 $H_c=785$ кА/м	ОВ	0.632
			обесточена	
			ОВ вкл. согласно	0.7
Амплитуда 1-ой гармоники магнитной индукции продольного поля якоря на уровне середины минимального зазора $B_{\delta m1d}$ (Т)	0.878	0.319 $H_c=0$	0.319 $H_c=0$ ОВ обесточена	
Амплитуда 1-ой гармоники магнитной индукции поперечного поля якоря на уровне середины минимального зазора $B_{\delta m1q}$ (Т)	0.573	0.573 $H_c=0$	0.573 $H_c=0$ ОВ обесточена	

Значение индукции  $B_{\delta m1o}$  при электромагнитном возбуждении получено при н.с. на пару полюсов  $F_{он}=6300$  А, а при комбинированном возбуждении-при н.с.  $F_o=3000$  А (н.с. на полюс 1500 А). Указанные в таблице для полей якоря значения  $H_c=0$  означают, что постоянные магниты отсутствуют, а сами поля определены при номинальном токе обмотки статора ( $I_{фн}=1109$  А).

По индукциям  $B_{\delta m1o}$  можно определить потоки полюса  $\Phi_o$ , так как

$$\Phi_o = 2/\pi \times B_{\delta m1o} \times S_\tau,$$

где  $S_\tau$  – поверхность на уровне середины минимального зазора в пределах полюсного деления  $\tau$  и расчетной длины машины  $l$  ( $S_\tau = 0.2755$  м<sup>2</sup>).

Расчеты потоков  $\Phi_o$  при комбинированном возбуждении дали следующие результаты:

$$B_{\delta m1o} = 0.561 \text{ Т} \rightarrow \Phi_o = 0.0984 \text{ Вб}$$

$$B_{\delta m1o} = 0.63 \text{ Т} \rightarrow \Phi_o = 0.111 \text{ Вб}$$

$$B_{\delta m1o} = 0.7 \text{ Т} \rightarrow \Phi_o = 0.1228 \text{ Вб}$$

Характеристика холостого хода, построенная по этим данным показана на рис.3. Относительное изменение потока при этом составило:

$$\Delta\Phi = (0.1228 - 0.0984) / 0.111 = 0.22 \text{ о.е. (или 22\%)}$$

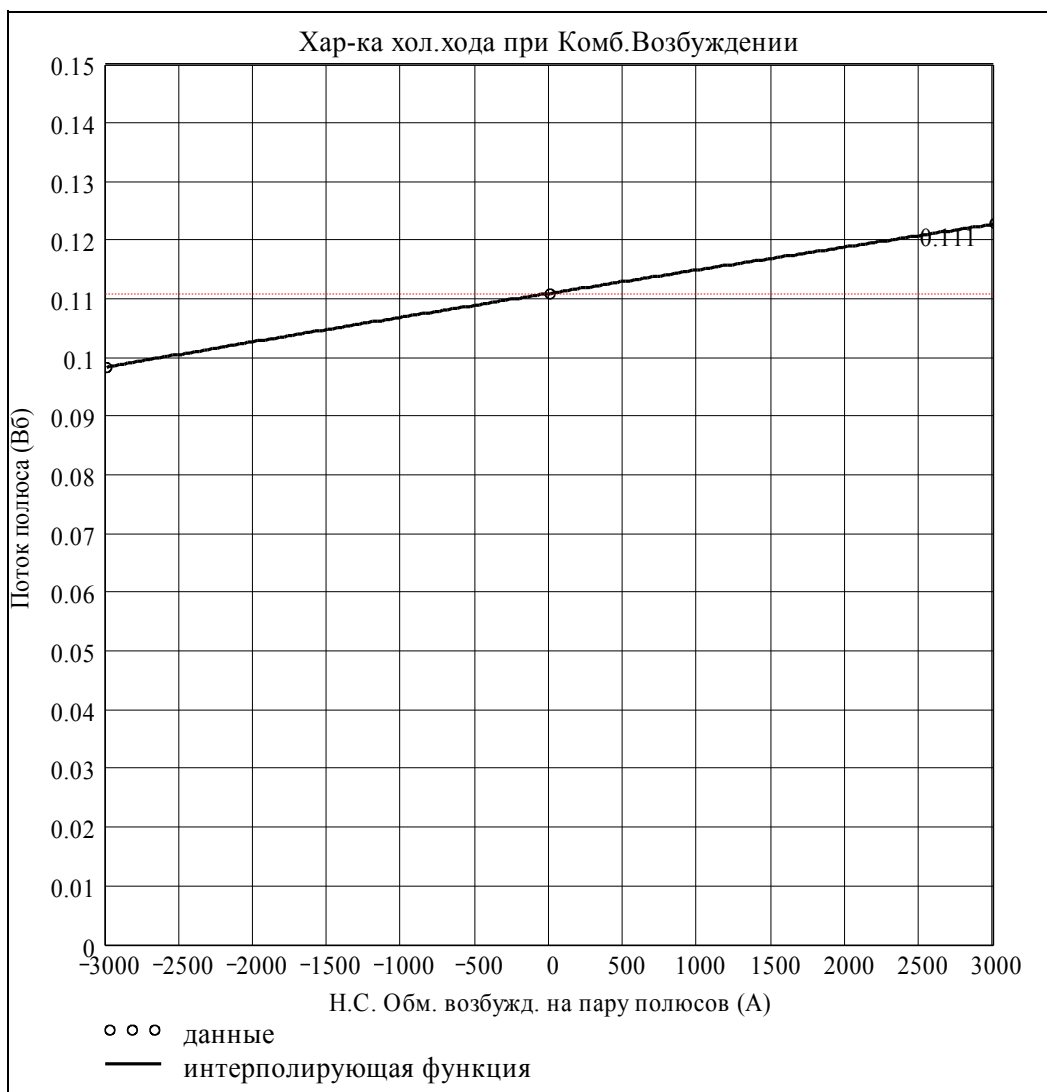


Рис.3. Характеристика холостого хода при комбинированном возбуждении.

### Заклучение

1. На конкретном примере показаны возможности пакета Elcut по формированию геометрии магнитной системы синхронной машины и расчету магнитных полей в ней при различных способах возбуждения явнополюсного ротора.
2. Представленные результаты моделирования и расчета получены путем последовательных приближений как в отношении геометрической конфигурации постоянных магнитов и обмотки возбуждения при магнитоэлектрическом и комбинированном возбуждении, так и в отношении параметров магнитов и электрических нагрузок дополнительной обмотки возбуждения.