

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРСИРОВАННОГО САМОВОЗБУЖДЕНИЯ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

В. С. БАКЛИН, В. И. ПОПОВ, К. А. ХОРЬКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и аппаратов и общей электротехники)

В последние годы начали разрабатываться и применяться автономные импульсные источники большой мощности с использованием в качестве накопителей и источников импульсной энергии специальных электрических машин — ударных генераторов. Импульсные источники, как правило, работают на однофазную нагрузку. Это позволяет использовать у трехфазного ударного генератора свободную фазу для подвозбуждения генератора. В случае однофазной конструкции ударного генератора (как правило, однофазная обмотка статора занимает не более  $\frac{2}{3}$  полюсного деления машины) в свободных пазах статора может быть уложена специальная обмотка для подвозбуждения генератора.

Применение ступенчатого возбуждения — предвозбуждения от маломощного источника энергии и форсированного самовозбуждения — находит применение в тех случаях, когда, во-первых, от ударного генератора за рабочий цикл требуется не более одного импульса тока, во-вторых, нет возможности или по каким-либо причинам нецелесообразно иметь мощный возбуждательный агрегат (ограничения по весу установки, отсутствие сети требуемой мощности и т. д.).

Форсированное самовозбуждение ударного генератора осуществляется за счет избыточной кинетической энергии вращающегося ротора. Известно, что в течение одного импульса тока ударный генератор может преобразовать в электромагнитную энергию и отдать нагрузке только некоторую долю запасенной ротором кинетической энергии. Например, ударный генератор Капицы-Костенко [5] отдает согласованной индуктивной нагрузке 20%, а ударный генератор фирмы СЕМ (Франция) [6] 23,4% запасенной кинетической энергии ротора.

Анализ различных схем самовозбуждения синхронных генераторов приведен в [2, 3] и других литературных источниках, однако в том аспекте, в каком необходимо рассматривать вопрос форсированного самовозбуждения ударного генератора, задача не решена.

Настоящая работа посвящена определению времени самовозбуждения ударного генератора и построению кривых нарастания напряжения на зажимах машины и тока возбуждения при форсированном самовозбуждении с разных начальных уровней потока.

Принципиальная схема установки изображена на рис. 1. На рисунке приняты следующие обозначения:

а, б, с — фазы обмотки статора ударного генератора,

ВУ — управляемое выпрямительное устройство,

ОВ — обмотка возбуждения,  
 ДО — демпферная обмотка,  
 А — аккумуляторная батарея,  
 К<sub>1</sub> — контактор начального возбуждения (предвозбуждения).

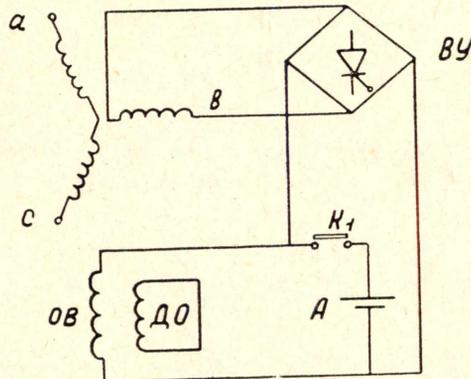


Рис. 1. Принципиальная схема установки

От аккумуляторной батареи генератор возбуждается до какого-то заданного напряжения предвозбуждения. Минимальная величина напряжения предвозбуждения должна быть достаточна для преодоления порогового напряжения выпрямительного устройства и падения напряжения под щетками.

От величины начального потока машины в большей степени зависит время самовозбуждения и скорость нарастания тока возбуждения, что важно знать при выборе элементов выпрямительного устройства.

При подаче управляющего сигнала на ВУ напряжение фазы «в» прикладывается к обмотке возбуждения генератора. Процесс самовозбуждения описывается следующим уравнением:

$$\Psi_{1\omega} = i_{B\Gamma_3} + k \frac{d\Psi_1}{dt}, \quad (1)$$

где

$\Psi_{1\omega}$  — э.д.с., индуцируемая в обмотке статора потоком возбуждения;

$\omega$  — угловая скорость вращения ротора;

$\Gamma_3$  — эквивалентное активное сопротивление цепей ротора с учетом сопротивления выпрямительного устройства;

$k$  — коэффициент приведения потокосцепления обмотки возбуждения к потокосцеплению фазы обмотки статора.

Для упрощения решения пренебрегаем активным и индуктивным сопротивлениями фазы, которые значительно меньше эквивалентных активного и индуктивного сопротивлений ротора. Влияние реакции якоря фазы на процесс самовозбуждения не учитываем. Нелинейность кривой намагничивания машины учитывается аппроксимацией теоретической или экспериментальной кривой намагничивания по Фрелиху, аналогично [1].

В относительных единицах

$$E = \Psi = \frac{a i_B}{1 + b \cdot i_B}, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  — коэффициенты аппроксимации, причем

$$b = a - 1.$$

Для сильно насыщенных машин, какими являются ударные генераторы, невозможно подобрать значение  $a$ , которое было бы справедливо для любых участков кривой намагничивания. Поэтому характеристику намагничивания разбиваем на несколько участков. Для начального, I-го участка кривой намагничивания значение  $a = r_{кр}$ , где  $r_{кр}$  — сопротивление, определяемое касательной к характеристике намагничивания из точки  $i_b = 0$ . Для следующих участков (колесо кривой намагничивания, насыщенная часть) значение  $a$  существенно отличается от  $r_{кр}$ .

Представим параметры машины в относительных единицах. Установившиеся значения напряжения генератора и потокосцепления определяются точкой пересечения кривой намагничивания машины с вольт-амперной характеристикой цепи возбуждения.

За единицу принимается потокосцепление  $\Psi_{он}$ , соответствующее номинальной эдс в режиме холостого хода генератора.

Обозначим через

$$\Psi_n^* = \frac{\Psi_n}{\Psi_y} \text{ — относительное текущее потокосцепление;}$$

$$\Psi_{нч}^* = \frac{\Psi_{нч}}{\Psi_y} \text{ — относительное значение начального потокосцепления;}$$

$$r_{\varepsilon}^* = \frac{r_{\varepsilon}}{r_b \cdot a_n} \text{ — относительное активное сопротивление цепи возбуждения с учетом выпрямительного устройства;}$$

$a_n$  — значение коэффициента аппроксимации для данного участка кривой намагничивания;

$r_b$  — базисное сопротивление, равное отношению номинального напряжения генератора в режиме холостого хода к номинальному току возбуждения.

Решение уравнения (1) относительно времени имеет вид

$$t^* = \sum_{n=1}^k \frac{1 - r_{\varepsilon n}^*}{1 - r_{\varepsilon n}^*} \ln \frac{1 - \Psi_{n-1}^*}{1 - \Psi_n^*} + \frac{1}{1 - r_{\varepsilon n}^*} \ln \frac{\Psi_n^*}{\Psi_{n-1}^*}, \quad (3)$$

где

$k$  — число участков аппроксимации характеристики намагничивания;

$\Psi_{n-1}^*$  — начальные значения потокосцепления на участке аппроксимации. При  $n=1$

$$\Psi_{n-1}^* = \Psi_n^*;$$

$t^*$  — относительное время самовозбуждения.

Время самовозбуждения в секундах

$$t = t^* \cdot T_b, \quad (4)$$

где

$T_b$  — постоянная времени цепи возбуждения, характеризуется параметрами установившегося режима.

Соответствие результатов расчета времени самовозбуждения действительной картине проверялось на модельном ударном генераторе, имеющем следующие параметры цепи возбуждения:

$r_2 = 3,2$  ом — активное сопротивление обмотки возбуждения;

$r_d = 8,3$  ом — активное сопротивление демпферной обмотки, приведенное к обмотке возбуждения;

$r_{доб} = 2$  ом — добавочное активное сопротивление, вводимое в цепь обмотки возбуждения;

$T_B = 0,043$  сек — постоянная времени цепи возбуждения;  
 $i_{BH} = 6$  а — номинальный ток возбуждения;  
 $E = \Psi_{OH} = 95$  в — номинальное напряжение на зажимах фазы генератора.

Характеристика намагничивания (рис. 2) разбивалась на два участка: I-й участок от  $\Psi = 0$  до  $0,6 \Psi_{OH}$ ; II-й участок от  $\Psi = 0,6$  до  $\Psi_y$ . Этим участкам соответствуют аппроксимирующие коэффициенты:  $a_I = r_{кр} = 1,8$ ;  $b_I = 0,8$ ;  $a_{II} = 2,8$ ;  $b_{II} = 1,8$ .

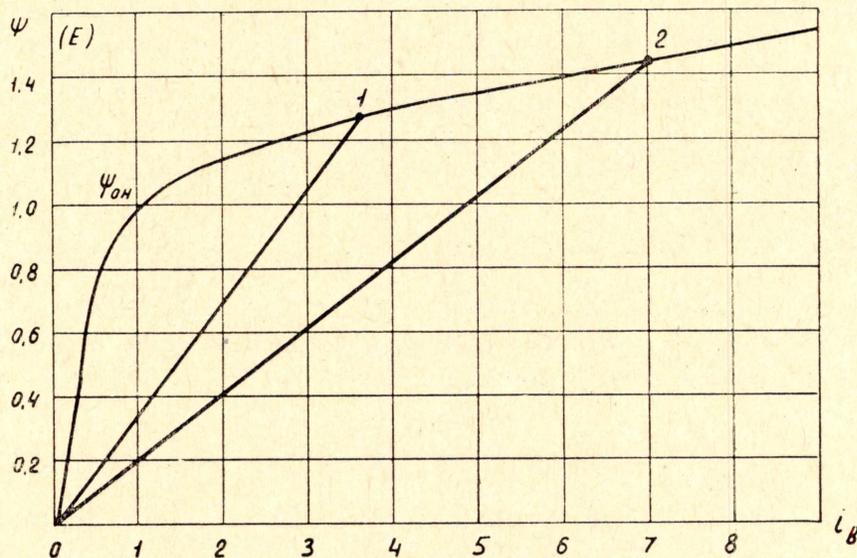


Рис. 2. Характеристика холостого хода генератора

Результаты расчета времени самовозбуждения при различных уровнях начального потока с дополнительным сопротивлением в цепи возбуждения и без него представлены в табл. 1 и 2. Эксперименталь-

Таблица 1

№ пп.	$\frac{\Psi_{нч}}{\Psi_{OH}}$	$\Psi^*_{n-1}$	$r^*_{эп}$	$t^*$	$t_{расч.}$ сек	$t_{эксп.}$ сек	Примечание
1	0,10	0,077	0,475	6,60	0,284	—	I участок $a_I = r_{кр} = 1,8$ $\Psi_y = 1,3$
2	0,20	0,154	0,475	5,16	0,222	—	
3	0,26	0,200	0,475	4,57	0,196	0,20	
4	0,40	0,308	0,475	3,56	0,153	—	
5	0,50	0,384	0,475	3,08	0,133	—	
6	0,60	0,460	0,305	2,60	0,112	—	II участок $a_{II} = 2,8$ $\Psi_y = 1,3$
7	0,70	0,540	0,305	2,27	0,097	0,10	
8	0,90	0,690	0,305	1,74	0,075	0,08	

Таблица 2

№ пп.	$\frac{\Psi_{нч}}{\Psi_{OH}}$	$\Psi^*_{n-1}$	$r^*_{эп}$	$t^*$	$t_{расч.}$ сек	$t_{эксп.}$ сек	Примечание
1	0,10	0,069	0,404	5,66	0,249	—	I участок $a_I = r_{кр} = 1,8$ $\Psi_y = 1,45$
2	0,20	0,138	0,404	4,41	0,194	—	
3	0,30	0,207	0,404	3,71	0,163	—	
4	0,43	0,296	0,404	3,04	0,133	0,14	
5	0,50	0,345	0,404	2,73	0,119	—	
6	0,60	0,414	0,260	2,35	0,103	—	II участок $a_{II} = 2,8$ $\Psi_y = 1,45$
7	0,76	0,524	0,260	1,95	0,086	—	
8	0,90	0,620	0,260	1,65	0,073	0,08	
9	1,0	0,690	0,260	1,44	0,063	0,06	

ная проверка проводилась осциллографированием тока возбуждения и напряжения на зажимах машины при самовозбуждении. Типичные осциллограммы представлены на рис. 3. Временные метки на осциллограммах соответствуют интервалам 0,02 сек. Результаты обработки полученных осциллограмм нанесены на расчетные кривые знаком (x), рис. 4. Кривая 1 соответствует времени самовозбуждения при наличии в цепи возбуждения добавочного сопротивления. Индексом «С» обозначена экспериментальная точка при начальном потоке  $\Psi_{нч} = 0,26 \Psi_{он}$ . Кривая 2 соответствует времени самовозбуждения без добавочного сопротивления.

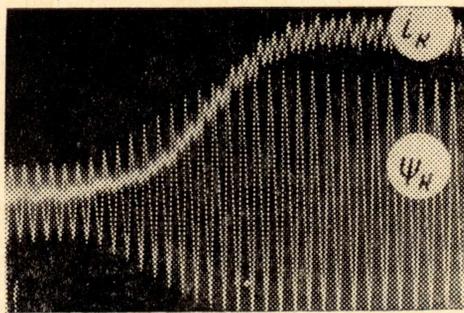
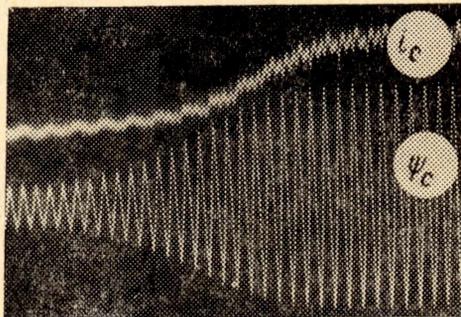


Рис. 3. Осциллограммы тока возбуждения и напряжения (потоко-сцепления) на зажимах генератора при:

а) добавочном сопротивлении в цепи возбуждения генератора и  $\Psi_{нч} = 0,26 \Psi_{он}$

б) отсутствии добавочного сопротивления в цепи возбуждения генератора и  $\Psi_{нч} = 0,43 \Psi_{он}$

Индексом «К» обозначена экспериментальная точка при начальном потоке  $\Psi_{нч} = 0,43 \Psi_{он}$ . Осциллограммы рис. 3 соответствуют этим точкам. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает хорошее совпадение экспериментального и расчетного времени самовозбуждения генератора.

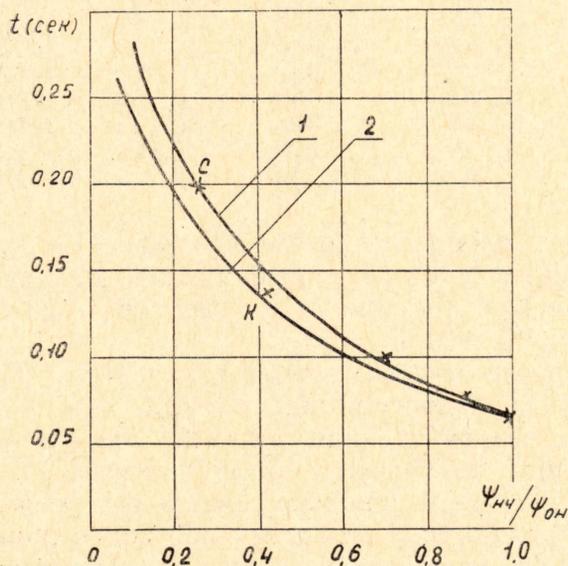


Рис. 4. Зависимость времени самовозбуждения генератора от уровня потоко-сцепления предвозбуждения

Расчет нарастания потокосцепления (эдс генератора во времени) выполняется с помощью выражения (3).

В табл. 3 приведены расчетные и экспериментальные значения  $\Psi(E)$  при наличии добавочного сопротивления в цепи обмотки возбуждения и при  $\Psi_{нч}=0,26 \Psi_{он}$ . В табл. 4 приведены расчетные и экспериментальные значения  $\Psi(E)$  без добавочного сопротивления в цепи возбуждения и при  $\Psi_{нч}=0,43 \Psi_{он}$ . Экспериментальные значения потокосцеплений получены обработкой осциллограмм рис. 3.

Таблица 3

№ пп	$\frac{\Psi}{\Psi_{сн}}$	$\Psi^*$	$r^*_{эп}$	$t^*$	$t_{расч.}$ сек	$t_{эксп.}$ сек	Примечание
1	0,30	0,230	0,475	0,351	0,015	0,016	$\Psi_{нч}=0,26$
2	0,40	0,307	0,475	1,008	0,043	0,044	$\Psi_y=1,3$
3	0,60	0,460	0,475	2,020	0,086	0,086	$a_I=1,8$
4	0,70	0,540	0,305	2,320	0,098	0,100	$a_{II}=2,8$
5	0,80	0,615	0,305	2,588	0,111	0,110	
6	1,00	0,770	0,305	3,146	0,135	0,138	
7	1,10	0,845	0,305	3,457	0,148	0,153	
8	1,20	0,925	0,305	3,920	0,168	0,170	
9	1,27	0,980	0,305	4,620	0,198	0,200	

Таблица 4

№ пп	$\frac{\Psi}{\Psi_{он}}$	$\Psi^*$	$r^*_{эп}$	$t^*$	$t_{расч.}$ сек	$t_{эксп.}$ сек	Примечание
1	0,50	0,345	0,404	0,308	0,013	0,010	$\Psi_{нч}=0,43$
2	0,55	0,380	0,404	0,495	0,017	0,016	$\Psi_y=1,45$
3	0,60	0,414	0,404	0,684	0,029	0,025	$a_I=1,8$
4	0,80	0,550	0,260	1,158	0,049	0,045	$a_{II}=2,8$
5	0,90	0,620	0,260	1,376	0,059	0,056	
6	1,00	0,690	0,260	1,610	0,069	0,067	
7	1,10	0,760	0,260	1,808	0,077	0,077	
8	1,20	0,830	0,260	2,054	0,088	0,088	
9	1,30	0,900	0,260	2,326	0,100	0,100	
10	1,40	0,965	0,260	2,819	0,121	0,120	
11	1,42	0,980	0,260	3,034	0,130	0,130	

На рис. 5 представлены эти потокосцепления. На этом же рисунке построены кривые нарастания тока возбуждения, полученные по характеристике намагничивания. Знаком (x) обозначены экспериментально найденные значения  $\Psi_k$ ,  $\Psi_c$ , и  $i_{вк}$ ,  $i_{вс}$ .

Расхождение расчетных и экспериментальных значений потокосцеплений и токов возбуждения незначительны.

Таким образом, рассмотренная методика расчета времени самовозбуждения ударного генератора с различных уровней начального потока предвозбуждения дает хорошее совпадение расчетов с экспериментом. Изложенная методика позволяет построить кривые нарастания потокосцепления (эдс генератора) и тока возбуждения во времени, что необходимо для правильного выбора, начала форсировки возбуждения (самовозбуждения) и выбора полупроводниковых элементов управляемого выпрямительного устройства.

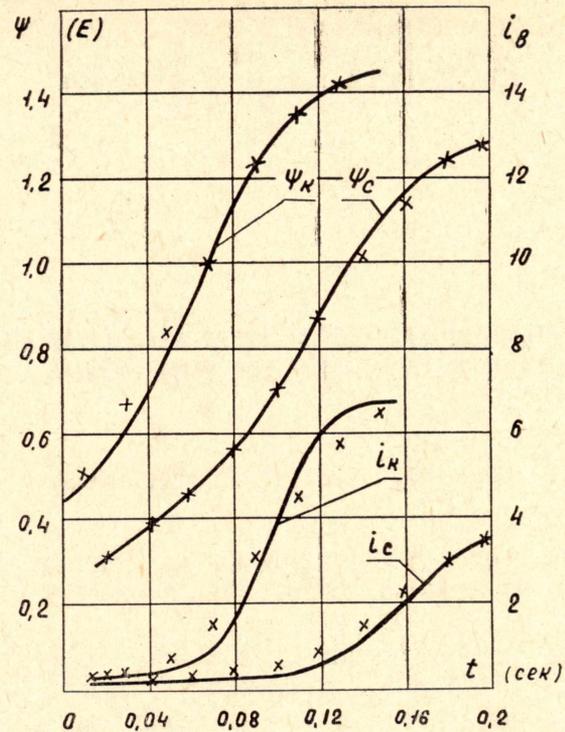


Рис. 5. Кривые изменения напряжения (потокосцепления) и тока возбуждения во времени

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Важнов. Электрические машины. «Энергия». 1969.
2. И. А. Глебов. Основные направления работ в области систем возбуждения синхронных машин. Сб.: «Расчет и исследование систем возбуждения синхронных машин». Изд. АН СССР, М.-Л., 1963.
3. А. Г. Здрок, А. А. Салютин. Системы самовозбуждения синхронных генераторов с магнитными усилителями. «Энергия», 1968.
4. Р. Рюденберг. Переходные процессы в электрических системах. ИЛ., 1955.
5. М. Б. Костенко. Электрические машины (специальная часть). ГЭИ, 1949.
6. Аккумуляция энергии во вращающихся электрических машинах. Экспресс-информация «Электрические машины и аппараты», 1970, № 36.