

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕРЫВИСТОГО  
ВОЗБУЖДЕНИЯ НА МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРА УДАРНОЙ  
МОЩНОСТИ**

**Г. А. СИПАЙЛОВ, А. И. ВЕРХОТУРОВ**

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В последнее время сложные переходные процессы в крупных электрических машинах успешно исследуются на физических моделях, которые воспроизводят весь комплекс явлений, характеризующих исследуемый процесс. В этот комплекс могут входить и такие стороны явлений, которые не поддаются математическому описанию и не могут быть учтены в уравнениях процесса. Кроме того, физические модели позволяют значительно сократить сроки исследования и материальные затраты на них, что особенно важно для ударных генераторов, экспериментальные исследования на которых связаны с токами в сотни тысяч ампер и напряжениями в десятки киловольты и, следовательно, отличаются чрезвычайной дороговизной установок.

В ударных генераторах для увеличения импульсной мощности и сокращения потерь холостого хода применяется форсировка возбуждения перед коротким замыканием обмотки статора [1]. В промежутках между импульсами целесообразно снижать напряжение до нуля или до определенного значения, так как работа машины при высоком напряжении холостого хода может привести к недопустимым перегревам. Поэтому представляет практический интерес исследовать режим прерывистого возбуждения ударного генератора на модели и выбрать оптимальный коэффициент форсировки с точки зрения минимума потерь энергии в расчете на один импульс тока статора.

Для установления этой зависимости рассмотрим переходный процесс включения обмотки возбуждения ударного генератора на постоянное напряжение:

$$\begin{aligned} \kappa u_2 &= i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt}, \\ 0 &= i_3 \cdot r_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt}, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\kappa$  — коэффициент форсировки,

$r_2, L_2$  — параметры обмотки возбуждения,

$r_3, L_3$  — параметры демферной обмотки,

$M_{23}$  — взаимоиндуктивность обмоток ротора.

Здесь и в дальнейшем принимаем, что  $M_{23} = \sqrt{L_2 L_3}$ , т. е. рассеяние отсутствует [2] и что  $L_2 \approx L_3$ .

Решая систему уравнений (1), находим выражения для токов:

$$i_2 = \frac{\kappa u_2}{r_2} \left( 1 - \frac{\delta_3}{\delta_2 + \delta_3} l^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (2)$$

$$i_3 = - \frac{\kappa u_2}{\sqrt{L_2 L_3} (\delta_2 + \delta_3)} l^{-\frac{t}{T}},$$

где  $\delta_2 = \frac{r_2}{L_2}$  — коэффициент затухания тока обмотки возбуждения.

$\delta_3 = \frac{r_3}{L_3}$  — коэффициент затухания тока в демпферной обмотке.

$T = T_2 + T_3$  — суммарная постоянная времени контуров.

Поток, создающий напряжение на обмотке статора, можно определить [3]:

$$\Phi = \Phi_0 \left( 1 - l^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (3)$$

$$\Phi_0 = \frac{M_{12} u_2}{r_2 \omega_1},$$

где  $\omega_1$  — число витков обмотки статора.

Если без форсировки возбуждения поток нарастает до номинального значения за время  $t = 3T$ , то при форсировке в  $\kappa$  раз поток достигнет того же значения за более короткое время  $t_1$ . Отсюда отношение потоков равно:

$$\frac{\kappa \left( 1 - l^{-\frac{t_1}{T}} \right)}{1 - l^{-\frac{t}{T}}} = 1. \quad (4)$$

Из этого выражения можно получить время  $t_1$ :

$$t_1 = -T \ln \frac{\kappa - 0,95}{\kappa}. \quad (5)$$

Процесс гашения поля путем изменения полярности подводимого напряжения описывается системой дифференциальных уравнений (1), если заменить  $\kappa u_2$  на  $-\kappa u_2$ .

Решение полученной системы уравнений имеет вид:

$$i_{2r} = \frac{u_2}{r_2} \left( \frac{1 + \kappa}{1 + m} l^{-\frac{t_1}{T}} - \kappa \right), \quad (6)$$

$$i_{3r} = \frac{u_2}{r_2} m \frac{1 + \kappa}{1 + m} l^{-\frac{t_1}{T}}, \quad (7)$$

где

$$m = \frac{r_2}{r_3} \sqrt{\frac{L_2}{L_3}}.$$

Поток, который необходимо погасить:

$$\Phi_r = \Phi_0 \left[ (1 + \kappa) l^{-\frac{t'_1}{T}} - \kappa \right]. \quad (8)$$

Время гашения можно определить из условия

$$i_{2r} + i_{3r} = 0. \quad (9)$$

После подстановки в уравнение (9) значений  $i_{2r}$  и  $i_{3r}$  из (8) и (7), решаем его относительно  $t'_1$ :

$$t'_1 = T \ln \frac{\kappa + 1}{\kappa}. \quad (10)$$

Потери энергии в стали ударного генератора при форсированном возбуждении и развозбуждении можно представить

$$Q_{ст} = \frac{P'_0}{\Phi_0^2} \left( \int_0^{t'_1} \Phi^2 \cdot dt + \int_0^{t'_1} \Phi_r^2 dt \right), \quad (11)$$

где  $P'_0$  — потери холостого хода в стали генератора при потоке  $\Phi_0$ . После подстановки в (11) значений  $\Phi$  из (3),  $\Phi_r$  из (8) и интегрирования получаем:

$$Q_{ст} = P'_0 T \left[ \kappa^2 \ln \frac{\kappa + 1}{\kappa - 0,95} - 1,95 \kappa + 0,05 \right], \quad (12)$$

Обозначим  $\kappa_c = \frac{Q_{ст}}{Q'_{ст}}$ , где  $Q'_{ст}$  — потери энергии в стали за цикл без форсировки, тогда

$$\kappa_c = 0,556 \left( \kappa^2 \ln \frac{\kappa + 1}{\kappa - 0,95} - 1,95 \kappa + 0,05 \right). \quad (13)$$

Энергию потерь в меди обмотки возбуждения и демпферной за цикл можно представить в следующем виде:

$$Q_m = \int_0^{t'_1} (i_2^2 r_2 + i_3^2 r_3) dt + \int_0^{t'_1} (i_{2r}^2 r_2 + i_{3r}^2 r_3) dt. \quad (14)$$

Или окончательно:

$$Q_m = \frac{u_2^2 T}{r_2} \left[ \kappa^2 \ln \frac{1 + \kappa}{\kappa - 0,95} + B (0,05 - 1,95 \kappa) \right]. \quad (15)$$

Обозначим по аналогии с предыдущим через  $\kappa_m$  отношение потерь в меди обмотки возбуждения и демпферной при форсировке к энергии потерь при  $\kappa = 1$ , тогда:

$$\kappa_m = \frac{\kappa^2 \ln \frac{1 + \kappa}{\kappa - 0,95} + B (0,05 - 1,95 \kappa)}{3,69 - 1,9 B} \quad (16)$$

Оптимальный коэффициент форсировки можно определить из условия равенства энергии потерь в меди обмоток ротора и в стали машины за цикл работы:

$$\frac{P_0' T \left( \kappa^2 \ln \frac{\kappa + 1}{\kappa - 0,95} - 1,95 \kappa + 0,05 \right)}{\frac{u_2^2 T}{r_2} \left[ \kappa^2 \ln \frac{1 + \kappa}{\kappa - 0,95} + B(0,05 - 1,95 \kappa) \right]} = 1. \quad (17)$$

Или после упрощений:

$$(1 - \kappa_0) \kappa^2 \ln \frac{\kappa + 1}{\kappa - 0,95} - 1,95 \kappa (\kappa_0 + B) + 0,05 (\kappa_0 - B) = 0. \quad (18)$$

где  $B = \frac{T_2}{T}$ ;  $\kappa_0 = \frac{P_0' r_2}{u_2^2}$  — отношение потерь в стали к потерям в обмотке возбуждения при холостом ходе.

При известных  $\kappa_0$  и  $B$  это трансцендентное уравнение можно решить приближенно с любой степенью точности относительно  $\kappa$ .

### Схема прерывистого возбуждения модели ударного генератора

На рис. 1 представлена схема прерывистого возбуждения модели ударного генератора (УГ).

При нажатии на кнопку  $\Pi$  через контакты контактора  $B$  подается напряжение на обмотку возбуждения  $ОВВ$  вращающегося возбудителя  $Я$ , который непосредственно соединен с обмоткой возбуждения ударного генератора  $ОВИ$ . Как только напряжение ударного генератора достигнет заданного значения, срабатывает реле напряжения  $РН$  и замыкает свой контакт в цепи индукционного датчика  $ИД$ . При продолжении э. д. с. генератора через нуль датчик вырабатывает кратковременные импульсы положительной и отрицательной полярности. Положительный импульс открывает тиратрон  $ТГ$  в цепи разряда конденсатора  $С$ , разрядный ток которого замыкает аппарат  $K_1$ . Через нагрузку  $L_n$  проходит импульс тока статора длительностью около  $0,02 \text{ сек}$ . Импульс тока статора имеет небольшую отрицательную полуволну, в течение которой аппарат  $K_2$  размыкает цепь статора.

При замыкании аппарата  $K_1$  замыкаются его контакт в цепи контактора  $И$  и реле времени  $РВ$ , что приводит к замыканию контактов  $И$  и размыканию контактов  $B$  в цепи возбуждения возбудителя. Ток в обмотке возбуждения возбудителя меняет направление, и как только напряжение ударного генератора становится равным нулю, реле времени  $РВ$  размыкает свой контакт в цепи контактора  $И$ . Прежде чем запустить схему снова, нужно привести в исходное состояние аппараты  $K_1$  и  $K_2$ .

Изменения напряжения на зажимах генератора и тока в обмотке возбуждения за цикл работы представлены на рис. 2. На рис. 3 представлена зависимость потерь холостого хода в стали в функции выходного напряжения. Потери определялись методом взаимной нагрузки (точки обозначены  $\odot$ ) и методом выбега (точки обозначены  $\times$ ). Зависимости потерь в функции от выходного напряжения хорошо

аппроксимируются функцией  $\frac{P_0' u_1^2}{u_{1n}^2}$ .

На рис. 4 представлена зависимость  $\kappa_c$  в функции от коэффициента форсировки, кривая 1 рассчитана по уравнению (13), а пунктирная кривая получена опытным путем. Кривая 2 показывает зависимость отношения суммарных потерь энергии в меди и стали при форсировке  $Q_{\Sigma k}$  к суммарным потерям без форсировки  $Q_{\Sigma 1}$  в функции от  $\kappa$ .

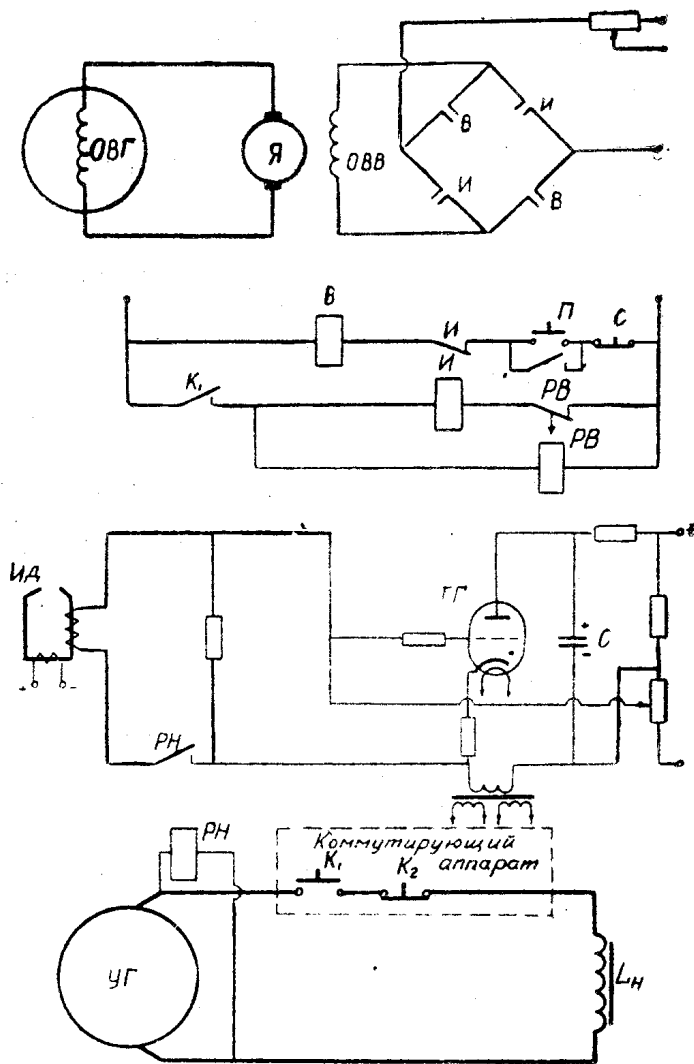


Рис. 1. Схема прерывистого возбуждения модели ударного генератора.

Зависимость энергии потерь в меди обмотки возбуждения за цикл от коэффициента форсировки представлена на рис. 5 (кривая 1.) Опытная кривая проведена пунктиром. Кривая 2 рассчитана по уравнению (16) и представляет зависимость отношения суммарных потерь энергии в меди обмоток ротора при форсировке к потерям энергии без форсировки. Оптимальный коэффициент форсировки, рассчитанный по уравнению (18) для параметров модели, равен 2,1.

Все расчеты проводились для следующих параметров модели ударного генератора:

$$u_2 = 40 \text{ в}, \quad I_2 = 30 \text{ а}, \quad \frac{T_3}{T_2} = 1, \quad T = 1,6 \text{ сек}, \quad \kappa_0 = 16,5, \quad B = 0,5.$$

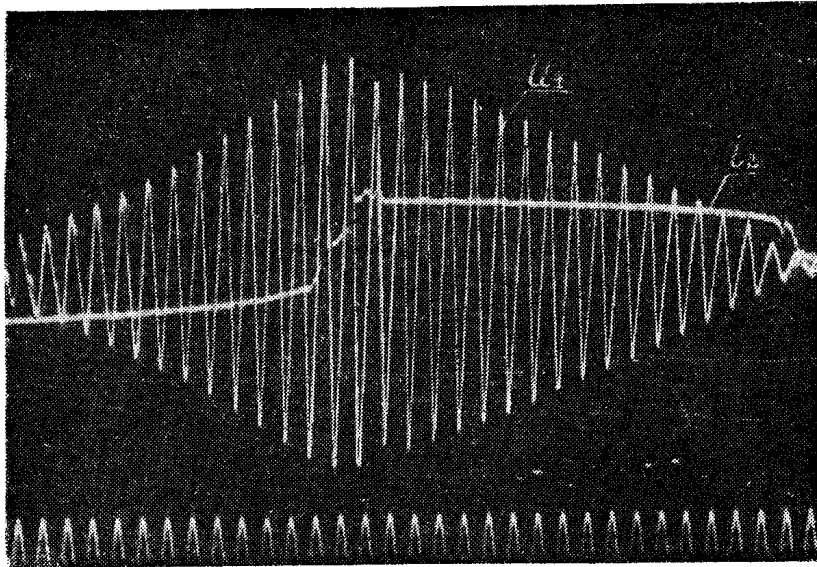


Рис. 2. Осциллограмма изменения напряжения на зажимах генератора и тока возбуждения

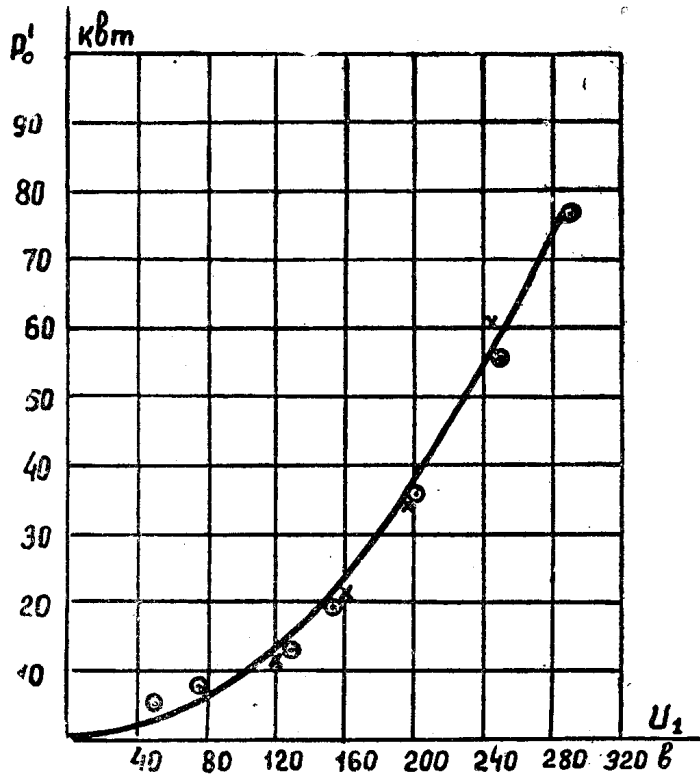


Рис. 3. Зависимость потерь в стали от выходного напряжения:  
 ○ — опыт взаимной нагрузки; (×) — опыт выбега

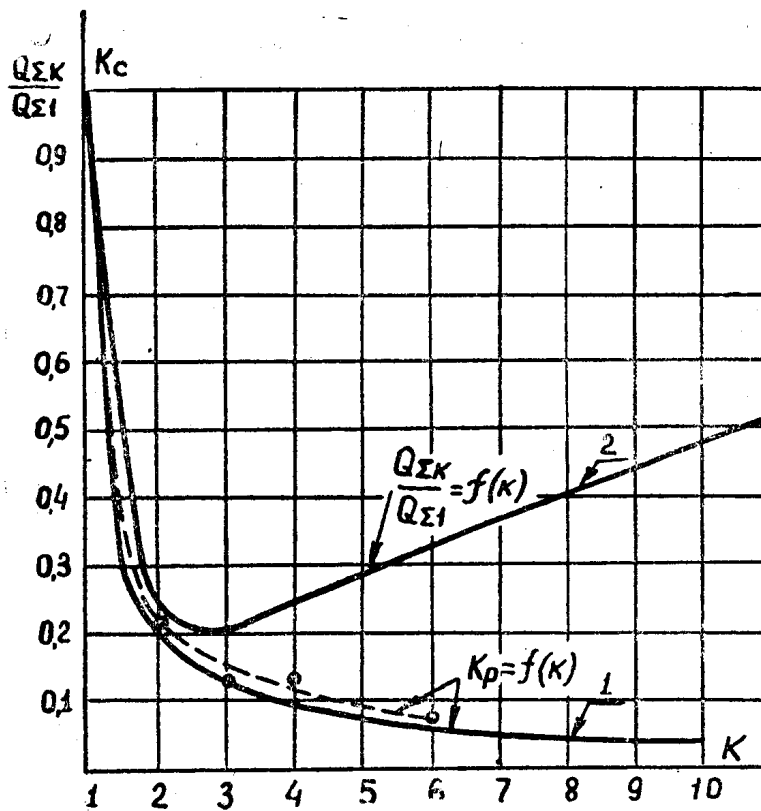


Рис. 4. Зависимость  $K_c$   $\frac{Q_{\Sigma K}}{Q_{\Sigma 1}}$  от коэффициента форсировки

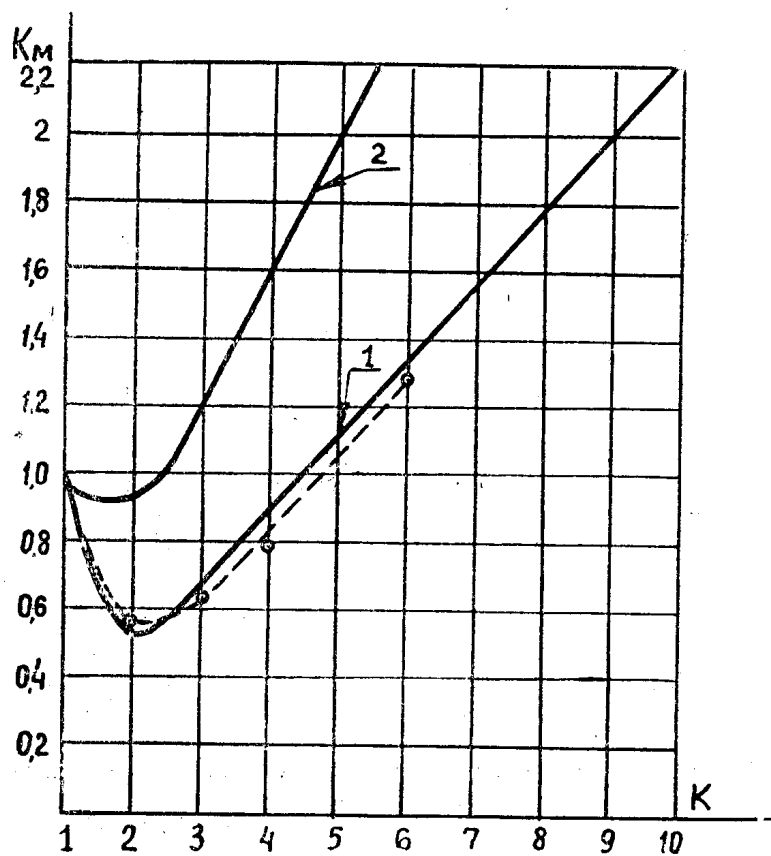


Рис. 5. Зависимость  $K_M$  от коэффициента форсировки

Опытные кривые были получены следующим образом. Осциллографировались изменение выходного напряжения  $u_1$  и токи возбуждения  $i_2$  за цикл работы для различных значений  $k = 1, 2, 3, 4, 6$ . При  $k = 1$  напряжение нарастало до установившегося значения  $40 \text{ в}$  за  $4,7$  секунды. Для всех коэффициентов форсировки напряжение нарастало до  $40 \text{ в}$ , после чего производилось замыкание обмотки статора генератора на нагрузку  $L_n$  и через  $0,02$  сек. развозбуждение. Отношение энергии потерь в стали при форсировке к энергии потерь без форсировки определялось как отношение квадратов площадей, описываемых кривыми изменения напряжения на зажимах генератора, а для энергии потерь в меди обмотки возбуждения — как отношение квадратов площадей, ограничиваемых кривыми изменения тока в обмотке возбуждения за цикл работы.

Таким образом, прерывистое возбуждение при оптимальном коэффициенте форсировки позволяет в пять раз сократить электромагнитные потери энергии в расчете на один импульс тока статора по сравнению с прерывистым возбуждением без форсировки при одинаковой частоте повторения импульсов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Постников. О проектировании ударного генератора. Труды ЛПИ № 209, Госэнергоиздат, 1960.
2. О. Б. Брон. Автоматы гашения магнитного поля. Госэнергоиздат, 1961.
3. Г. А. Сипайлов, А. И. Верхотуров. О форсировке возбуждения ударного генератора. Известия ТПИ, т. 160, 1966