

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:

$$k u_2 = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt},$$

$$0 = i_3 \cdot r_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt},$$

где k — коэффициент форсировки,

r_2, L_2 — параметры обмотки возбуждения,

r_3, L_3 — параметры демферной обмотки,

M_{23} — взаимдуктивность 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 ω_1 — число витков обмотки статора.

Если без форсировки возбуждения поток нарастает до номинального значения за время $t = 3T$, то при форсировке в κ 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 κu_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 Φ_0 . После подстановки в (11) значений Φ из (3), Φ_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:

$$Q_m = \int_0^{t_1'} (i_{2r}^2 r_2 + i_{3r}^2 r_3) dt + \int_0^{t_1'} (i_{2r}^2 r_2 + i_{3r}^2 r_3) dt. \quad (14)$$

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 κ_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 κ_0 и B это трансцендентное уравнение можно решить приближенно с любой степенью точности относительно κ .

Схема прерывистого возбуждения модели ударного генератора

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

При нажатии на кнопку Π 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 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 $В$ 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 κ_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 κ .

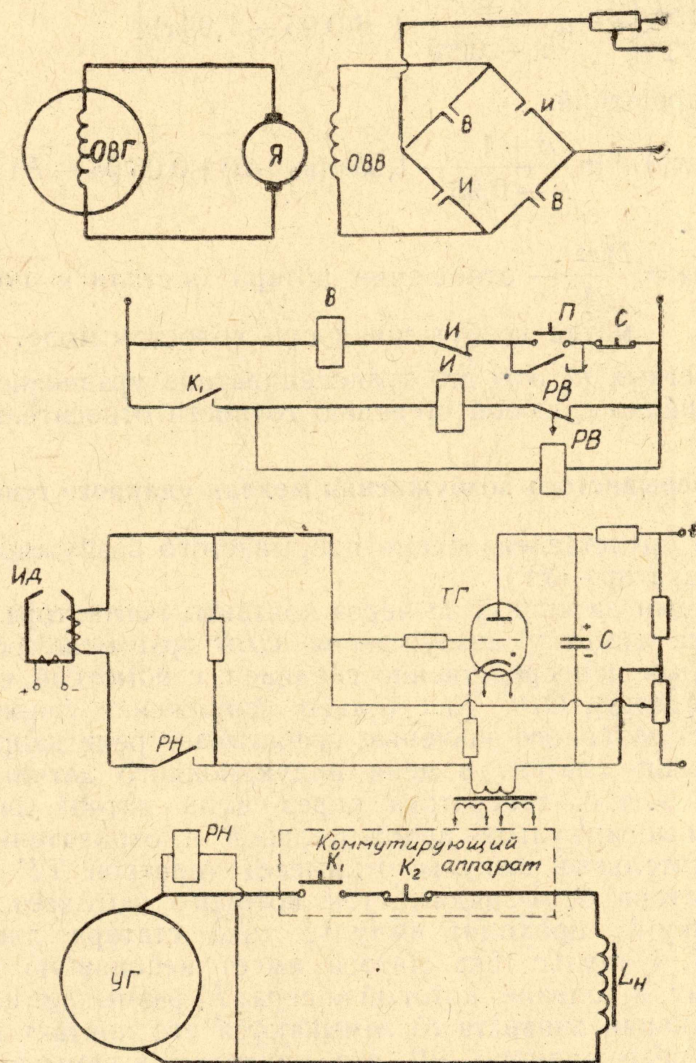


Рис. 1. Схема прерывистого возбуждения модели ударного генератора.

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:

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

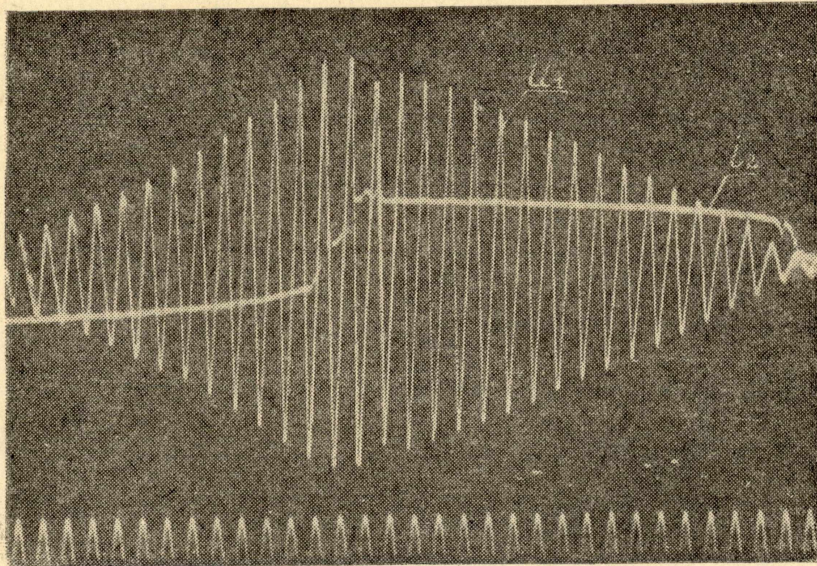


Рис. 2. Осциллограмма изменения напряжения на зажимах генератора и тока возбуждения

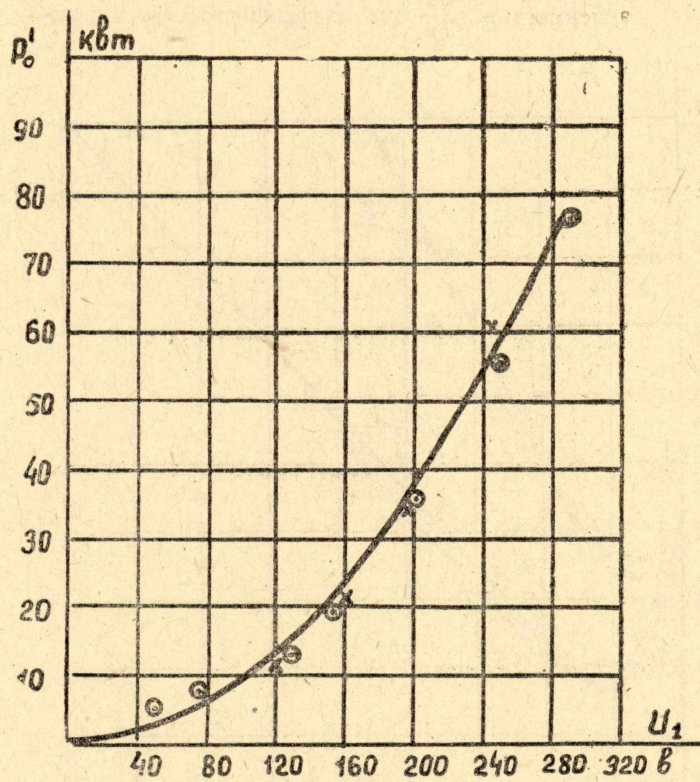


Рис. 3. Зависимость потерь в стали от выходного напряжения:
 ○ — опыт взаимной нагрузки; (×) — опыт выбега

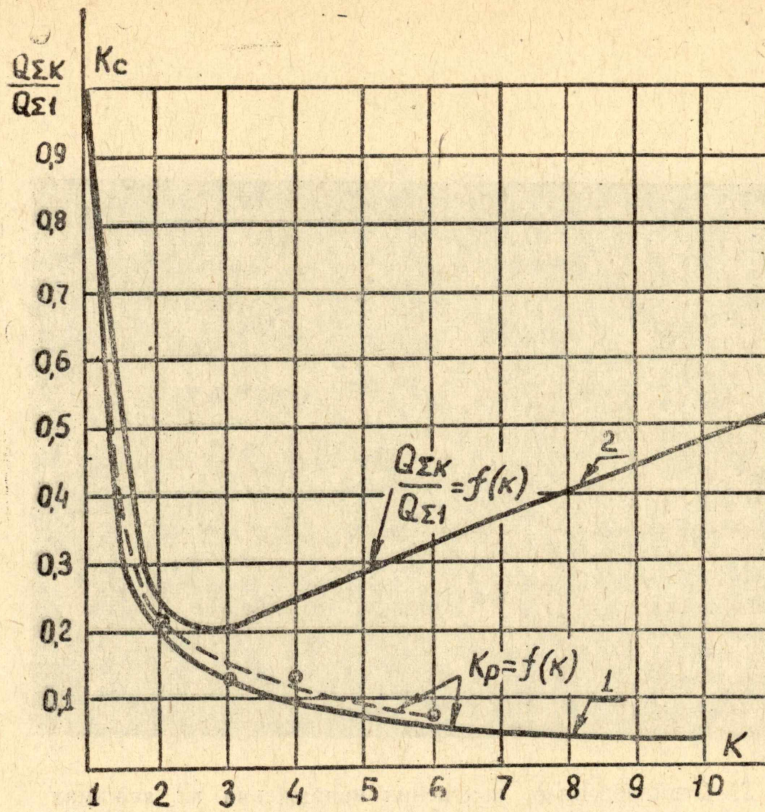


Рис. 4. Зависимость K_{Σ} $\frac{Q_{\Sigma K}}{Q_{\Sigma 1}}$ от коэффициента форсировки

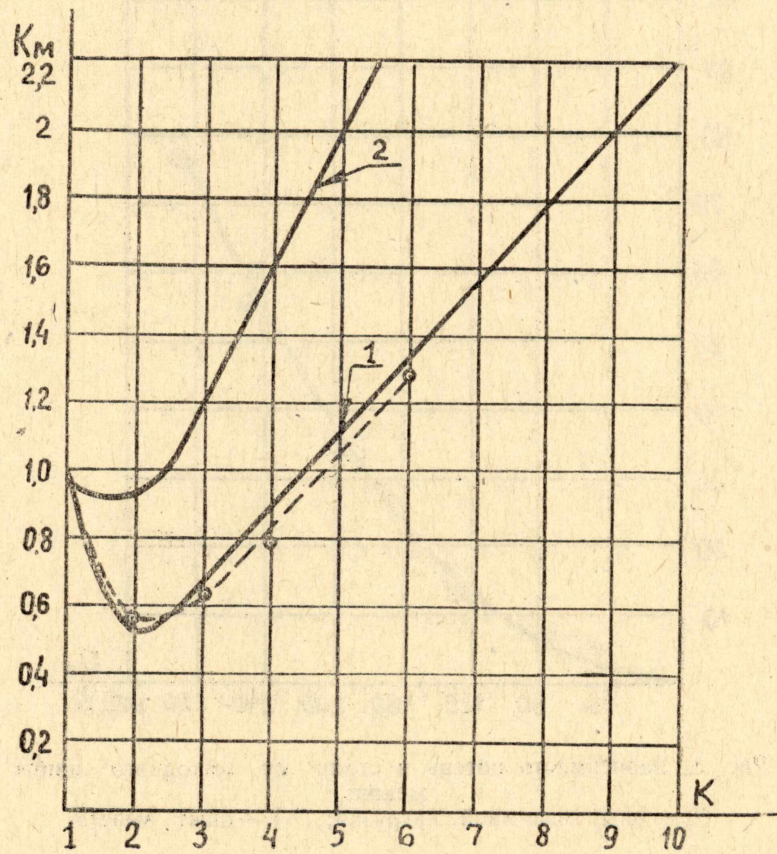


Рис. 5. Зависимость K_M от коэффициента форсировки

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 в за $4,7$ секунды. Для всех коэффициентов форсировки напряжение нарастало до 40 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.