

**РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ФОРСИРОВКИ  
ИЗ УСЛОВИЯ МИНИМУМА ПОТЕРЬ  
ХОЛОСТОГО ХОДА УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА**

Г. А. СИПАЙЛОВ, А. И. ВЕРХОТУРОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Ударные генераторы имеют более высокие потери холостого хода по сравнению с турбогенераторами такой же габаритной мощности. Это обусловлено большей насыщенностью участков магнитной цепи ударных генераторов, а также и тем, что из-за уменьшенного воздушного зазора большой удельный вес приобретают добавочные потери. Основную часть потерь холостого хода ударного генератора составляют потери в стали, превышающие в несколько раз потери в меди обмотки возбуждения. Поэтому в ударных генераторах вопрос о сокращении потерь энергии в расчете на один импульс тока статора приобретает особо важное значение. С этой целью в ударных генераторах при определенной длительности пауз между одиночными импульсами целесообразно применять прерывистое возбуждение с форсированным нарастанием магнитного потока до требуемой величины перед каждым включением генератора и последующим гашением магнитного поля после импульса тока статора [1].

В данной статье рассматривается вопрос расчетного определения оптимального коэффициента форсировки возбуждения и развозбуждения из условия минимума потерь холостого хода генератора в расчете на один импульс тока статора, дается сравнение прерывистого возбуждения с другими видами возбуждения и устанавливаются границы его применения.

В [2, 3] получены зависимости энергии потерь в стали машины и в меди обмоток ротора при холостом ходе за цикл работы ударного генератора для любого коэффициента форсировки  $K$ . Для стали:

$$Q_{\text{ст}} = P_0^1 T \left( k^2 \ln \frac{k+1}{k-0,95} - 1,95k + 0,05 \right). \quad (1)$$

Для меди обмоток ротора:

$$Q_{\text{мц}} = \frac{u_2^2 T}{r_2} \left[ k^2 \ln \frac{k+1}{k-0,95} + B(0,05 - 1,5k) \right], \quad (2)$$

где

$P_0^1$  — потери холостого хода в стали машины,  
 $T = T_2 + T_3$  — суммарная постоянная времени обмотки возбуждения и демпферной,  
 $u_2$  — напряжение на зажимах обмотки возбуждения,  
 $r_2$  — активное сопротивление обмотки возбуждения,

$B = \frac{T_2}{T}$  — отношение постоянной времени обмотки возбуждения к суммарной постоянной времени контуров ротора.

Обозначим  $k_c = \frac{Q_{сц}}{Q'_{сц}}$ , где  $Q'_{сц}$  — потери энергии в стали за цикл работы ударного генератора без форсировки, тогда

$$k_c = 0,556 \left( k^2 \ln \frac{k+1}{k-0,95} - 1,95k + 0,05 \right). \quad (3)$$

Зависимость  $k_c$  от коэффициента форсировки представлена на рис. 1, а.

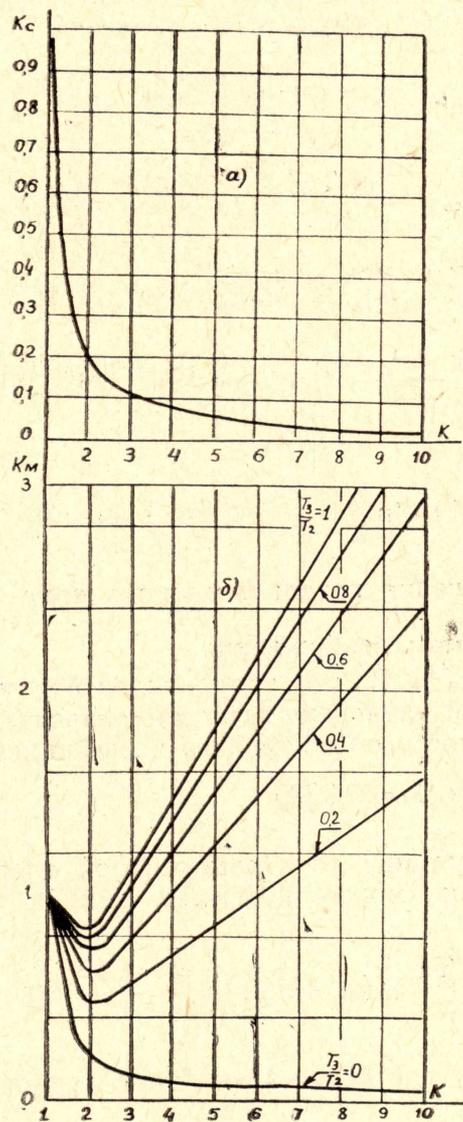


Рис. 1. Зависимость  $k_c$  и  $k_M$  от коэффициента форсировки.

По аналогии с предыдущим обозначим через  $k_M$  отношение потерь в меди обмотки возбуждения и демпферной при форсировке за цикл работы к энергии потерь при  $k=1$ , тогда

$$k_M = \frac{k^2 \ln \frac{k+1}{k-0,95} + B(0,05 - 1,95k)}{3,69 - 1,9B} \quad (4)$$

Результаты расчета влияния форсировки на величину энергии потерь в меди обмоток ротора в функции  $k$  для различных значений  $\frac{T_3}{T_2}$  представлены на рис. 1 б.

Из анализа рисунков 1 а и 1 б видно, что существует оптимальный коэффициент форсировки, при котором энергия электромагнитных потерь будет минимальна. Оптимальный коэффициент форсировки определяется из условия равенства энергии потерь в стали машины (1) и в меди обмоток ротора (2) за цикл работы. Предварительно упростим выражения (1) и (2). При выводе этих формул принималось, что напряжения и токи достигают установившихся значений при отсутствии форсировки за время  $t=3 T$ , однако теоретически это время равно бесконечности, тогда (1), (2) можно записать

$$Q_{ст} = P_0' T k \left( k \ln \frac{k+1}{k-1} - 2 \right), \quad (5)$$

$$Q_{мц} = \frac{u_2^2 T k}{r_2} \left( k \ln \frac{k+1}{k-1} - 2B \right). \quad (6)$$

Уравнения имеют смысл для  $k > 1$ . Приравниваем правые части уравнений (5), (6):

$$P_0' T k \left( k \ln \frac{k+1}{k-1} - 2 \right) = \frac{u_2^2 T k}{r_2} \left( k \ln \frac{k+1}{k-1} - 2B \right). \quad (7)$$

После упрощений:

$$(k_0 - 1) k \ln \frac{k+1}{k-1} + 2(B - k_0) = 0, \quad (8)$$

где  $k_0 = \frac{P_0' r_2}{u_2^2}$  — отношение потерь холостого хода в стали машины к потерям в меди обмотки возбуждения.

При известных  $k_0$  и  $B$  это трансцендентное уравнение решается приближенно с любой степенью точности относительно  $k$ . На рис. 2 представлена зависимость оптимального коэффициента форсировки  $k_{оп}$  в функции от  $\frac{T_3}{T_2}$  для  $k_0 = 6 \div 20$ .

Зависимость суммарной электромагнитной энергии потерь от коэффициента форсировки можно получить, сложив правые части уравнения (5) и (6):

$$Q_{\Sigma k} = \frac{u_2^2 T k}{r_2} \left[ (k_0 + 1) k \ln \frac{k+1}{k-1} - 2(k_0 + B) \right]. \quad (9)$$

Обозначим  $k_2 = \frac{Q_{\Sigma k}}{Q_{\Sigma 1}}$ , где  $Q_{\Sigma 1}$  — суммарные потери при  $k=1$ , тогда

$$k_2 = \frac{k [k(k_0 + 1) \ln \frac{k+1}{k-1} - 2(k_0 + B)]}{3,69 + 1,69 k_0 - 2B}. \quad (10)$$

Если в (10) вместо  $k$  подставить  $k_{оп}$ , то это уравнение показывает отношение энергии потерь при оптимальном коэффициенте форсировки к энергии потерь при  $k=1$ . Зависимость  $k_2$  в функции отношения  $\frac{T_3}{T_2}$  представлена на рис. 3, а.

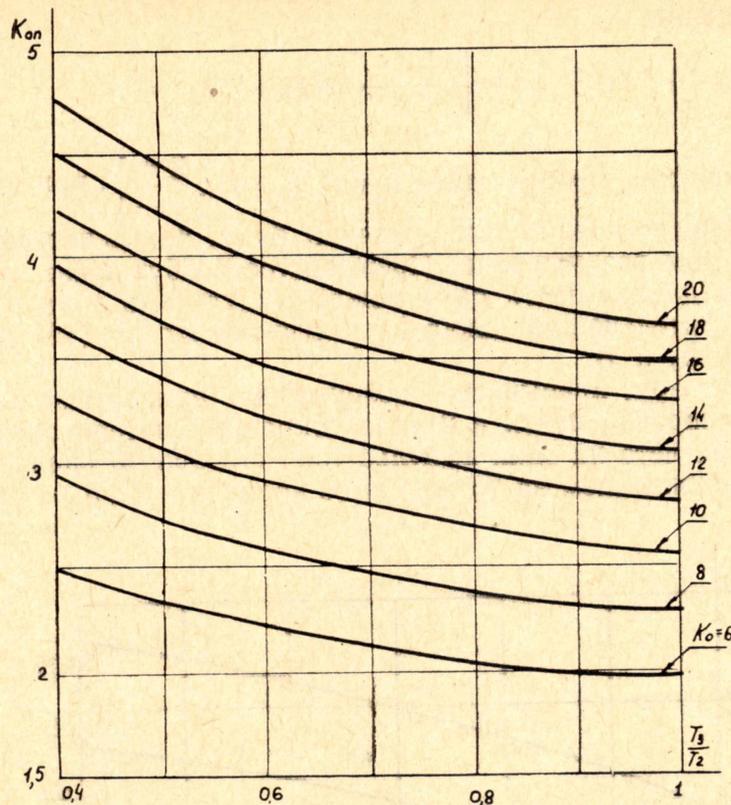


Рис. 2. К расчету оптимального коэффициента форсировки.

Обозначим по аналогии через  $k_3$  отношение энергии потерь за цикл при оптимальном коэффициенте форсировки к энергии потерь при постоянном возбуждении за то же самое время:

$$k_3 = \frac{u_2^2 T k [(k_0 + 1) k \ln \frac{k+1}{k-1} - 2(k_0 + B)]}{r_2 \left( P_0^1 + \frac{u_2^2}{r_2} \right) t_{\text{ц}}}, \quad (11)$$

где  $t_{\text{ц}} = T \ln \frac{k+1}{k-1}$  — время цикла.

Или окончательно:

$$k_3 = \frac{k [(k_0 + 1) k \ln \frac{k+1}{k-1} - 2(k_0 + B)]}{(k_0 + 1) \ln \frac{k+1}{k-1}}, \quad (12)$$

Результаты расчета по (12) представлены на рис. 3 б. Прерывистое возбуждение становится целесообразным тогда, когда электромагнитные потери энергии за цикл при прерывистом возбуждении меньше потерь энергии за то же самое время при постоянном возбуждении:

$$\frac{\left( P_0^1 + \frac{u_2^2}{r_2} \right) t_{\text{ц}}}{\frac{u_2^2 T k}{r_2} [(k_0 + 1) k \ln \frac{k+1}{k-1} - 2(k_0 + B)]} = 1. \quad (13)$$

После упрощений:

$$(k_0 + 1)(k^2 - 1) \ln \frac{k + 1}{k - 1} - 2k(k_0 + B) = 0, \quad (14)$$

Из этого уравнения можно найти  $k$  или  $t_{ц} = T \ln \frac{k + 1}{k - 1}$ , при котором потери энергии при постоянном возбуждении будут равны потерям энергии при прерывистом возбуждении. Прерывистое возбуждение можно применять, когда длительности пауз между импульсами тока статора будут больше длительностей цикла  $t_{ц}$ , рассчитанных по (14) для заданных значений  $k_0$  и  $B$ .

Таким образом, прерывистое возбуждение при оптимальном коэффициенте форсировки почти в 2 раза сокращает потери энергии холостого хода в расчете на один импульс тока статора по сравнению с постоянным возбуждением за то же самое время и в 3-5 раз сокращает

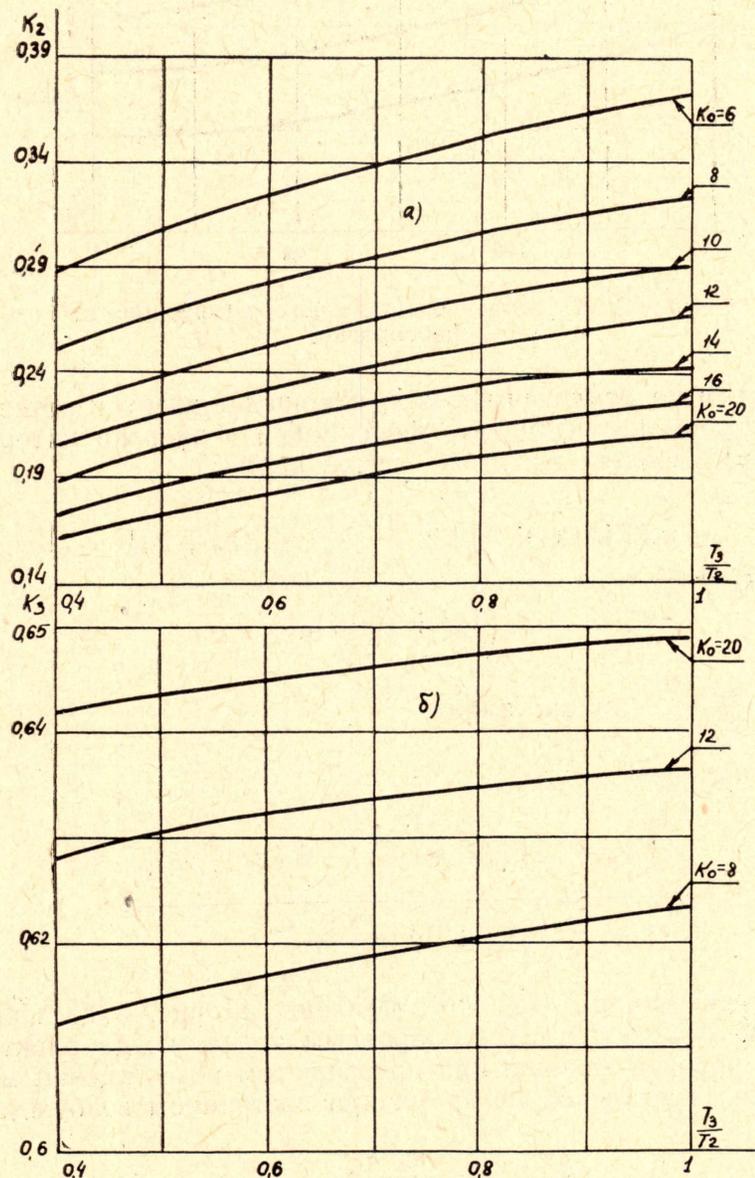


Рис. 3 Сравнение прерывистого возбуждения при  $k=k_{оп}$  с прерывистым возбуждением при  $k=1$  и с постоянным возбуждением.

энергию потерь по сравнению с прерывистым возбуждением без форсировки.

Применение прерывистого возбуждения становится целесообразным при длительностях пауз больше длительностей цикла, рассчитанных по (14).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Постников. О проектировании ударного генератора, Труды ЛПИ № 209, Госэнергоиздат, 1960.
2. Г. А. Сипайлов, А. И. Верхотуров. О форсировке возбуждения ударного генератора, Известия ТПИ, т. 160, 1966.
3. Г. А. Сипайлов, А. И. Верхотуров. Экспериментальное исследование прерывистого возбуждения на модели ударного генератора, Известия ТПИ, т. 162, 1966.