

УЧЕТ НАСЫЩЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ПРЕРЫВИСТОГО  
ВОЗБУЖДЕНИЯ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, А. И. ВЕРХОТУРОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В цепях со сталью индуктивность сохраняет постоянное значение только в пределах прямолинейного участка кривой намагничивания. Поэтому приведенные в [1] соотношения для расчета допустимых коэффициентов форсировки при прерывистом возбуждении, справедливые при постоянной индуктивности, не могут быть применены при расчете переходных процессов с насыщенным магнитопроводом, а так как ударные генераторы могут работать в режимах с сильным насыщенным, то допущение о постоянстве индуктивности может привести к значительным погрешностям при расчете.

В данной статье ставится задача учесть насыщение магнитной цепи при расчете допустимого коэффициента форсировки и оценить погрешность, которая получается при расчете с постоянной индуктивностью.

Для расчета переходных процессов в цепях возбуждения с учетом насыщения наиболее широко применяется метод кусочно-линейной аппроксимации [2].

Замена характеристики нелинейного сопротивления отрезками прямых линий дает возможность перейти от нелинейного дифференциального уравнения к нескольким линейным дифференциальным уравнениям, отличающимся лишь значениями коэффициентов.

Практически кривую намагничивания заменяют двумя прямыми  $aa$  и  $ab$  (рис. 1). В таком случае имеются постоянные индуктивности на каждом участке.

Пренебрегая потоком рассеяния между обмотками успокоительной и возбуждения, для включения обмотки возбуждения на постоянное напряжение  $ku_2$  получим следующую систему дифференциальных уравнений для насыщенной части характеристики холостого хода:

$$\left. \begin{aligned} r_2 i_2 + L_{2\alpha} \frac{di_2}{dt} + \sqrt{L_{2\alpha} \cdot L_{3\alpha}} \frac{di_3}{dt} &= ku_2 \\ r_3 i_3 + L_{3\alpha} \frac{di_3}{dt} + \sqrt{L_{2\alpha} \cdot L_{3\alpha}} \frac{di_2}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где

$r_2, r_3$  — активные сопротивления обмотки возбуждения и демпферной,  
 $L_{2\alpha}, L_{3\alpha}$  — индуктивности тех же обмоток в ненасыщенной области,



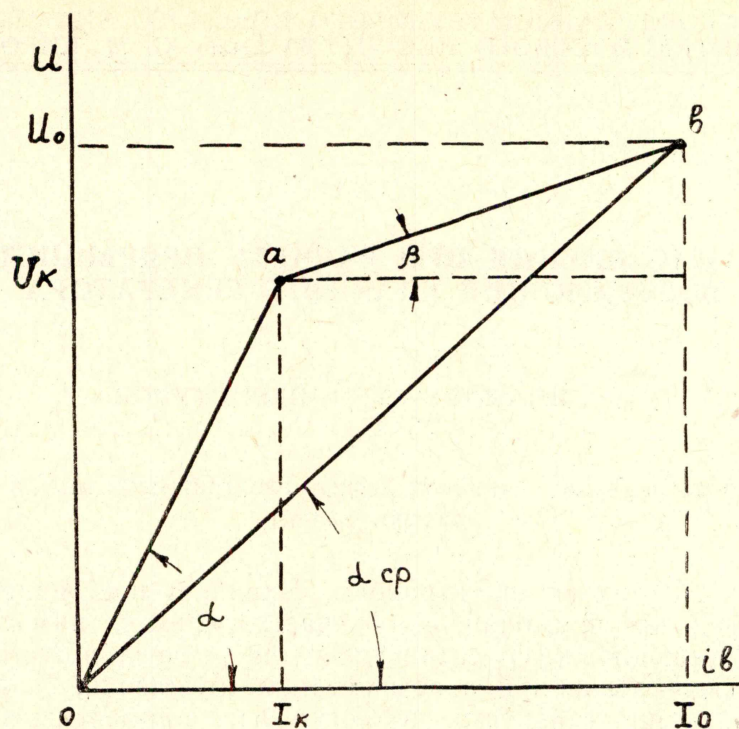


Рис. 1. К учету насыщения методом кусочно-линейной аппроксимации

$k$  — кратность напряжения, подводимого к обмотке возбуждения по сравнению с номинальным.  
Решение системы (1):

$$i_2 = \frac{u_2}{r_2} \left[ k + (n - k) B e^{-\frac{t}{T_\alpha}} \right], \quad (2)$$

$$i_3 = \frac{u_2}{r_2} (1 - B)(n - k) e^{-\frac{t}{T_\alpha}}, \quad (3)$$

где  $T_{2\alpha} = \frac{L_{2\alpha}}{r_2}$   $T_{3\alpha} = \frac{L_{3\alpha}}{r_3}$  — постоянные времени обмотки возбуждения и демпферной в ненасыщенной области,

$T_\alpha = T_{2\alpha} + T_{3\alpha}$  — суммарная постоянная времени ротора в ненасыщенной области,

$B = \frac{T_{2\alpha}}{T_\alpha}$  — отношение постоянной времени обмотки возбуждения к суммарной постоянной времени в ненасыщенной области.

$n$  — коэффициент, показывающий, с какого значения напряжения на зажимах генератора начинается форсировка.

Значение  $n$  изменяется в пределах  $0 \leq n \leq m$ , где  $m = \frac{I_k}{I_0}$ .

Поток, который электромагнитным путем передается из ротора в статор, пропорционален суммарному току обмоток ротора и коэффициенту взаимной индукции между ротором и статором  $M_{\alpha}$ .



где

$$\Phi_a = \Phi_{0a} \left[ k - (k - n)e^{-\frac{t_1}{T_a}} \right], \quad (4)$$

$$\Phi_{0a} = \frac{u_2}{r_2} \frac{M_a}{w_1},$$

$w_1$  — число витков обмотки статора.  
 Время нарастания потока до точки «а» определяется из условия равенства суммарного тока обмоток величине  $I_k = m \frac{u_2}{r_2}$ .

$$t_1 = T_a \ln \frac{k - n}{k - m}. \quad (5)$$

Потери энергии в стали машины за промежуток времени от 0 до  $t_1$ :

$$Q_{ca} = \frac{P_0'}{\Phi_H^2} \int_0^{t_1} \Phi_a^2 \cdot dt, \quad (6)$$

где

$$\Phi_H = \frac{u_2}{r_2 w_1} [M_\beta + m(M_a - M_\beta)] = \frac{u_2 M_a}{r_2 w_1} [c + m(1 - c)], \quad (7)$$

$$c = \frac{M_\beta}{M_a} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \text{ — отношение взаимоиндуктивностей на насыщенном и ненасыщенном участках,}$$

$P_0'$  — потери холостого хода в стали машины.  
 После подстановки в (6) значения потока  $\Phi_a$  из (4) и интегрирования получим

$$Q_{ca} = \frac{P_0' T_a}{[c + m(1 - c)]^2} \left[ k^2 \ln \frac{k - n}{k - m} - (m - n)(k + 0,5m + 0,5n) \right]. \quad (8)$$

Для энергии потерь в меди обмотки возбуждения и демпферной

$$Q_{Ba} = \int_0^{t_1} i_2^2 \cdot r_2 \cdot dt = \frac{u_2^2}{r_2} T_a \left\{ k^2 \ln \frac{k - n}{k - m} - (m - n)B[k(2 - B) + 0,5B(m + n)] \right\}, \quad (9)$$

$$Q_{da} = \int_0^{t_1} i_3^2 \cdot r_3 \cdot dt = \frac{u_2^2}{r_2} (1 - B) T_a (m - n)(k - 0,5m - 0,5n). \quad (10)$$

После перехода магнитной системы в насыщенное состояние система дифференциальных уравнений имеет прежний вид (1), только взамен ненасыщенных величин с индексом  $\alpha$  войдут насыщенные величины с индексом  $\beta$ . Решение этой системы с учетом новых начальных условий при  $t_2 = 0$

$$i_2 + i_3 = m \frac{u_2}{r_2} \quad (11)$$



имеет вид:

$$i_2 = \frac{ku_2}{r_2} \left( 1 - B \frac{k-m}{k} e^{-\frac{t_2}{T_\beta}} \right), \quad (12)$$

$$i_3 = - \frac{u_2(k-m)}{\sqrt{L_{2\beta} \cdot L_{3\beta}(\delta_{2\beta} + \delta_{3\beta})}} e^{-\frac{t_2}{T_\beta}}, \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_{2\beta} &= \frac{r_2}{L_{2\beta}} \\ \delta_{3\beta} &= \frac{r_3}{L_{3\beta}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{— коэффициенты затухания токов в обмотке воз-} \\ &\text{буждения и демпферной в насыщенной области,} \\ L_{2\beta}, L_{3\beta} &\text{— индуктивности обмотки возбуждения и демпфер-} \\ &\text{ной в насыщенной области,} \\ T_\beta = T_{2\beta} + T_{3\beta} &\text{— суммарная постоянная времени ротора в насы-} \\ &\text{щенной области,} \end{aligned}$$

$$B = \frac{T_{2\beta}}{T_\beta} = \frac{T_{2\alpha}}{T_\alpha} \text{— отношение постоянной времени обмотки возбуж-}$$

дения к суммарной постоянной в насыщенной и ненасыщенной областях.

Суммарный ток обмоток возбуждения и демпферной

$$i_2 + i_3 = \frac{ku_2}{r_2} \left( 1 - \frac{k-m}{k} e^{-\frac{t_2}{T_\beta}} \right). \quad (14)$$

Время нарастания суммарного тока от  $m \frac{u_2}{r_2}$  до установившегося значения можно определить из условия равенства суммарного тока величине  $\frac{u_2}{r_2}$ .

$$t_2 = T_\beta \ln \frac{k-m}{k-1}. \quad (15)$$

Время нарастания суммарного тока от значения, соответствующего точке а (рис. 1), до  $0,95 \frac{u_2}{r_2}$

$$t_2' = T_\beta \ln \frac{k-m}{k-0,95}. \quad (16)$$

Поток на участке аб равен потоку в точке перегиба  $m \frac{u_2}{r_2} \frac{M_\alpha}{w_1}$ , плюс добавка от разности токов  $\left( i_2 - \frac{u_2}{r_2} m \right) \frac{M_\beta}{w_1}$  (рис. 1), тогда

$$\begin{aligned} \Phi_\beta &= \frac{mu_2 M_\alpha}{r_2 w_1} + \frac{ku_2}{r_2 w_1} M_\beta \left( 1 - \frac{k-m}{k} e^{-\frac{t_2}{T_\beta}} \right) - \\ &- \frac{mu_2 M_\beta}{r_2 w_1} = \frac{M_\alpha u_2}{r_2 w_1} \left\{ (1-c)m + c \left[ k - (k-m)e^{-\frac{t_2}{T_\beta}} \right] \right\}. \quad (17) \end{aligned}$$



Зависимость энергии потерь в стали машины от коэффициента форсировки на участке ab:

$$Q_{c\beta} = \frac{P_0'}{\Phi_H^2} \int_0^{t_2} \Phi_{\beta}^2 \cdot dt = \frac{P_0' T_{\beta}}{[c+m(1-c)]^2} \left\{ [(1-c)m + ck]^2 \times \right. \\ \left. \times \ln \frac{k-m}{k-1} + (m-1)c(2m - 1,5mc + ck + 0,5c) \right\}. \quad (18)$$

Энергия, выделяющаяся в виде потерь в обмотке возбуждения на участке ab, равна:

$$Q_{B\beta} = \int_0^{t_2} i_2^2 \cdot r_2 \cdot dt = \frac{u_2^2}{r_2} T_{\beta} \left[ k^2 \ln \frac{k-m}{k-1} + (m-1)B(2k + \right. \\ \left. + 0,5Bm + 0,5B - Bk) \right]. \quad (19)$$

В демпферной обмотке:

$$Q_{D\beta} = \int_0^{t_2} i_3^2 \cdot r_3 \cdot dt = \frac{u_2^2}{r_2} T_{\beta} (m-1)B(k + 0,5m + 0,5). \quad (20)$$

Сложив правые части уравнений (19) и (20), получим энергию потерь, выделяющихся в обмотке возбуждения и демпферной за время  $t_2$ .

$$Q_{\beta M} = \frac{u_2^2}{r_2} T_{\beta} \left[ k^2 \ln \frac{k-m}{k-1} + (m-1)B(k + 0,5m + 0,5) \right]. \quad (21)$$

Зная зависимость энергии потерь в меди обмотки возбуждения от коэффициента форсировки на 2-х участках, можно найти допустимый коэффициент форсировки из условия равенства энергии потерь, выделяющихся в обмотке возбуждения при прерывистом форсированном возбуждении и постоянном возбуждении за одно и то же время. Однако более правильным будет определение допустимого коэффициента форсировки для всего цикла работы с учетом второго этапа прерывистого возбуждения — форсированного гашения.

Ударные генераторы обладают мощной успокоительной обмоткой, демпфирующие контуры которой замкнуты накоротко. Поэтому даже после полного отключения тока в обмотке возбуждения остается значительный по величине и медленно затухающий магнитный поток. Единственной возможностью осуществить гашение поля является воздействие на магнитное поле демпфирующих контуров каким-нибудь другим магнитным полем противоположного направления [2, 3].

Рассмотрим качественную сторону процесса гашения. Пренебрегая потоком рассеяния между обмотками успокоительной и возбуждения, получим следующую систему дифференциальных уравнений для насыщенной части характеристики холостого хода:

$$r_2 \cdot i_2 + L_{2\beta} \frac{di_2}{dt} + \sqrt{L_{2\beta} \cdot L_{3\beta}} \frac{di_3}{dt} = -ku_2, \\ r_3 \cdot i_3 + L_{3\beta} \frac{di_3}{dt} + \sqrt{L_{3\beta} \cdot L_{2\beta}} \frac{di_2}{dt} = 0. \quad (22)$$



Решение этой системы уравнений имеет вид:

$$i_2 = -\frac{u_2}{r_2} \left[ (1+k) \text{Be}^{-\frac{t_3}{T_\beta}} - k \right], \quad (23)$$

$$i_3 = -\frac{u_2}{r_2} (1+k)(1-B) \text{e}^{-\frac{t_3}{T_\beta}}. \quad (24)$$

Время гашения поля на первом участке можно определить из условия равенства суммарного тока в точке перегиба величине  $m \frac{u_2}{r_2}$ :

$$t_3 = T_\beta \ln \frac{k+1}{k+m}. \quad (25)$$

На участке ab поток изменяется по соотношению:

$$\Phi_\beta = \frac{u_2 M_a}{r_2 W_1} \left\{ m(1-c) + c \left[ (1+k) \text{e}^{-\frac{t_3}{T_\beta}} - k \right] \right\} \quad (26)$$

Энергия, выделяющаяся в стали машины за время  $t_3$ , равна:

$$Q_{c\beta r} = \frac{P_0' T_\beta}{[c + m(1-c)]^2} \left\{ \ln \frac{k+1}{k+m} [m(1-c) - ck]^2 + \right. \\ \left. + (1-m)c(2m - 1,5mc - kc + 0,5c) \right\}. \quad (27)$$

В обмотке возбуждения

$$Q_{v\beta r} = \int_0^{t_3} i_2^2 \cdot r_2 \cdot dt = \frac{u_2^2 T_\beta}{r_2} \left\{ k^2 \ln \frac{k+1}{k+m} + \right. \\ \left. + (m-1)B[2k - B(k + 0,5m + 0,5)] \right\}. \quad (28)$$

В демпферной обмотке

$$Q_{d\beta r} = \int_0^{t_3} i_3^2 \cdot r_3 \cdot dt = -\frac{u_2^2}{r_2} (1-B) T_\beta (m-1) \times (k + 0,5m + 0,5). \quad (29)$$

Сложив правые части уравнений (28) и (29), получим энергию потерь, выделяющуюся в демпферной обмотке и обмотке возбуждения:

$$Q_{v\beta r} + Q_{d\beta r} = \frac{u_2^2}{r_2} T_\beta \left[ k^2 \ln \frac{k+1}{k+m} + B(m-1)(k - 0,5m - 0,5) \right]. \quad (30)$$

После перехода магнитной системы в ненасыщенное состояние система дифференциальных уравнений будет иметь прежний вид (22), но вместо величин с индексом  $\beta$  в них войдут величины с индексом  $\alpha$ .

С учетом новых начальных условий:

$$i_2(0) + i_3(0) = m \frac{u_2}{r_2} \quad (31)$$



выражения для токов равны

$$i_2 = \frac{u_2}{r_2} \left[ (k + m) B e^{-\frac{t_4}{T_a}} - k \right], \quad (32)$$

$$i_3 = \frac{u_2}{r_2} (k + m) (1 - B) e^{-\frac{t_4}{T_a}} \quad (33)$$

Время гашения определяется из условия

$$i_2 + i_3 = n \frac{u_2}{r_2}, \quad (34)$$

откуда

$$t_4 = T_a \ln \frac{k + m}{k + n}. \quad (35)$$

Поток на участке oa:

$$\Phi_a = \frac{u_2 M_a}{r_2 u_1} \left[ (k + m) e^{-\frac{t_4}{T_a}} - k \right]. \quad (36)$$

Зависимость потерь в стали от k для участка oa:

$$Q_{c\sigma} = \frac{P_o' T_a}{[c + m(1 - c)]^2} \left[ k^2 \ln \frac{k + m}{k + n} + (m - n)(0,5m + 0,5n - k) \right], \quad (37)$$

Энергия потерь, выделяющаяся в обмотке возбуждения на участке oa, равна

$$Q_{B\sigma} = \int_0^{t_4} i_2^2 \cdot r_2 \cdot dt = \frac{u_2^2 T_a}{r_2} \left[ k^2 \ln \frac{k + m}{k + n} + (m - n) B (0,5mB + 0,5nB + Bk - 2k) \right]. \quad (38)$$

В демпферной обмотке

$$Q_{d\sigma} = \int_0^{t_4} i_3^2 \cdot r_3 \cdot dt = \frac{u_2^2}{r_2} T_a (1 - B) B (m - n) \cdot (0,5m + 0,5n + k). \quad (39)$$

Суммарные потери в обмотках ротора для участка oa:

$$Q_{B\sigma} + Q_{d\sigma} = \frac{u_2^2 T_a}{r_2} \left[ k^2 \ln \frac{k + m}{k + n} + B (m - n) (0,5m + 0,5n - k) \right]. \quad (40)$$

Зная распределение потерь в меди и стали машины от коэффициента форсировки при форсированном возбуждении и развозбуждении, можно найти суммарные потери за цикл работы.

Для стали:

$$Q_{c\sigma} = \frac{P_o' T_a}{[c + m(1 - c)]^2} \left\{ k^2 \ln \frac{(k - n)(k + m)}{(k - m)(k + n)} + c[(1 - c)m + \right. \\ \left. + ck]^2 \ln \frac{k - m}{k - 1} + c[m(1 - c) - ck]^2 \ln \frac{k + 1}{k + m} + 2k[c^3(m - 1) - m + n] \right\} \quad (41)$$



Для меди обмотки возбуждения:

$$Q_{мвц} = \frac{u_2^2 T_a}{r_2} \left\{ k^2 \ln \frac{(k+1)^c (k-m)^{c-1} (k-n)}{(k-1)^c (k+m)^{c-1} (k+n)} + \right. \\ \left. + 2Bk(B-2)[(m-n) - c(m-1)] \right\}. \quad (42)$$

Энергия потерь, выделяющаяся за цикл работы в обмотке возбуждения и демпферной, равна

$$Q_{мц} = \frac{u_2^2 T_a}{r_2} \left\{ k^2 \ln \frac{(k+1)^c (k-m)^{c-1} (k-n)}{(k-1)^c (k+m)^{c-1} (k+n)} + \right. \\ \left. + 2Bk[c(m-1) - m + n] \right\}. \quad (43)$$

Время нарастания и спада магнитного поля, определяющее длительность цикла работы ударного генератора при прерывистом возбуждении, можно получить, сложив выражения (5), (15), (25) и (35):

$$t_{ц} = T_a \ln \frac{(k+1)^c (k-m)^{c-1} (k-n)}{(k-1)^c (k+m)^{c-1} (k+n)}. \quad (44)$$

Представляет интерес рассмотреть зависимость отдельных составляющих потерь энергии при прерывистом возбуждении и при постоянном возбуждении за одно и то же время для различных коэффициентов форсировки.

Обозначим  $k_{4н} = \frac{Q_{сц}}{P_{отц}}$ , где  $P_{отц}$  — потери энергии в стали машины за время, равное циклу работы при постоянном возбуждении

$$k_{4н} = \frac{k^2 \ln \frac{(k-n)(k+m)}{(k-m)(k+n)} + N \ln \frac{k-m}{k-1} + F \ln \frac{k+1}{k+m} +}{[c + m(1-c)]^2 \ln \frac{(k+1)^c (k-m)^{c-1} (k-n)}{(k-1)^c (k+m)^{c-1} (k+n)} + 2k[c^3(m-1) - m + n]}, \quad (45)$$

где

$$N = c[(1-c)m + ck]^2$$

$$F = c[m(1-c) - ck]^2.$$

Результаты расчета по (45) представлены на рис. 2 для следующих параметров, учитывающих насыщение машины [4]:

$$m=0,5; c=0,317; \text{ для } n=0 \text{ и } n=0,5.$$

При прерывистом возбуждении для  $n=0$  с увеличением коэффициента форсировки до двух потери в стали сокращаются почти в 3 раза по сравнению с постоянным возбуждением за то же самое время. При дальнейшем увеличении коэффициента форсировки потери энергии в стали остаются почти постоянными, равными потерям при  $k=2$ .

При  $n=0,5$  и  $k=2$  энергия потерь в стали машины в расчете на один импульс тока статора уменьшается примерно в 1,3 раза по сравнению с постоянным возбуждением, однако, длительность цикла для одного и того же коэффициента форсировки при  $n=0,5$  уменьшается почти в 2 раза по сравнению с длительностью цикла при  $n=0$ .



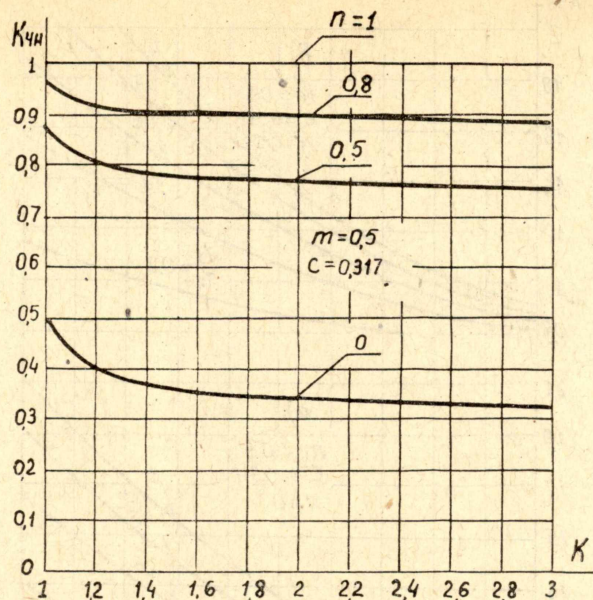


Рис. 2. Зависимость отношения энергии потерь в стали при прерывистом и постоянном возбуждении от коэффициента форсировки.

По аналогии обозначим  $k_{5н} = \frac{Q_{мц}}{\frac{u_2^2}{r_2} t_{ц}}$ ,

где  $\frac{u_2^2 t_{ц}}{r_2}$  — потери энергии в обмотке возбуждения и демпферной при постоянном возбуждении за цикл работы

$$k_{5н} = k^2 + \frac{2Bk[c(m-1) - m + n]}{\ln \frac{(k+1)^c(k-m)^{c-1}(k-n)}{(k-1)^c(k+m)^{c-1}(k+n)}}. \quad (46)$$

Результаты расчета по уравнению (46) представлены на рис. 3, а и б для  $n=0$  и  $n=0,5$ . Величина  $B$  зависит от отношения  $\frac{T_3}{T_2}$ , при расчете это отношение изменялось в пределах  $0,2 \div 1$ .

Из рис. 3, а и б следует, что при  $n=0$ ,  $\frac{T_3}{T_2} = 0,8$  равенство энергии потерь в роторе при постоянном и прерывистом возбуждении достигается при  $k=1,38$ , а для  $n=0,5$  при  $k=1,2$ .

Однако при  $k=1,2$  и  $n=0,5$  длительность цикла будет в 2,3 раза меньше, чем при  $n=0$  и  $K=1,38$  при этом потери в стали для  $n=0$  и  $K=1,38$  в 2,7 раза меньше по сравнению с постоянным возбуждением, а при  $n=0,5$  и  $K=1,2$  — в 1,23 раза меньше по сравнению с постоянным возбуждением за одно и то же время.

Отношение энергии потерь в обмотке возбуждения при прерывистом возбуждении к энергии потерь в обмотке возбуждения при постоянном возбуждении за цикл работы обозначим через  $k_{6н}$ , тогда

$$k_{6н} = k^2 + \frac{2Bk(B-2)[(m-n) - c(m-1)]}{\ln \frac{(k+1)^c(k-m)^{c-1}(k-n)}{(k-1)^c(k+m)^{c-1}(k+n)}}. \quad (47)$$



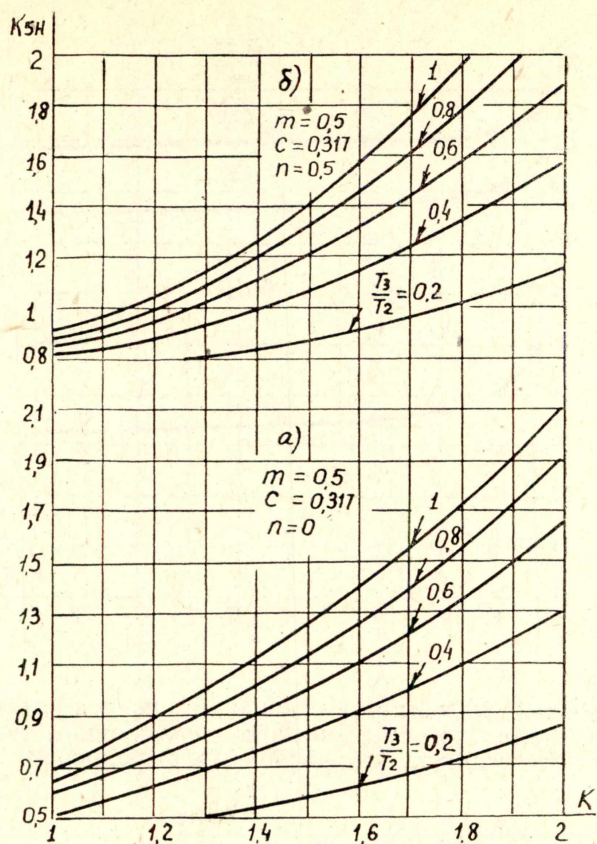


Рис. 3. Зависимость  $K_{5H}$  от коэффициента форсировки

Результаты расчетов по уравнению (47) представлены на рис. 4, а и б для  $n=0$  и  $n=0,5$ .

Из анализа приведенных зависимостей видно, что с увеличением кратности форсировки потери энергии в стали в расчете на один импульс сокращаются по сравнению с потерями при постоянном возбуждении за одно и то же время. С другой стороны, возрастают потери в обмотках ротора. Если принять, что потери в обмотке возбуждения при прерывистом возбуждении равны потерям, выделяющимся в обмотке за то же самое время при непрерывном возбуждении, то допустимый коэффициент форсировки может быть определен из выражения:

$$\frac{u_2^2 T_a}{r_2} \left\{ k^2 \ln \frac{(k+1)^c (k-m)^{c-1} (k-n)}{(k-1)^c (k+m)^{c-1} (k+n)} + 2Bk(B-2)[(m-n) - c(m-1)] \right\} \frac{u_2^2 T_a \ln \frac{(k+1)^c (k-m)^{c-1} (k-n)}{(k-1)^c (k+m)^{c-1} (k+n)}}{r_2} = 1 \quad (48)$$

После упрощений

$$(k^2 - 1) \ln \frac{(k+1)^c (k-m)^{c-1} (k-n)}{(k-1)^c (k+m)^{c-1} (k+n)} + 2Bk(B-2)[(m-n) - c(m-1)] = 0. \quad (49)$$

Для известных параметров машины это трансцендентное уравнение можно решить приближенно относительно  $K$ . Результаты расчетов по уравнению (49) представлены на рис. 5 для  $n=0$  и  $n=0,5$ .



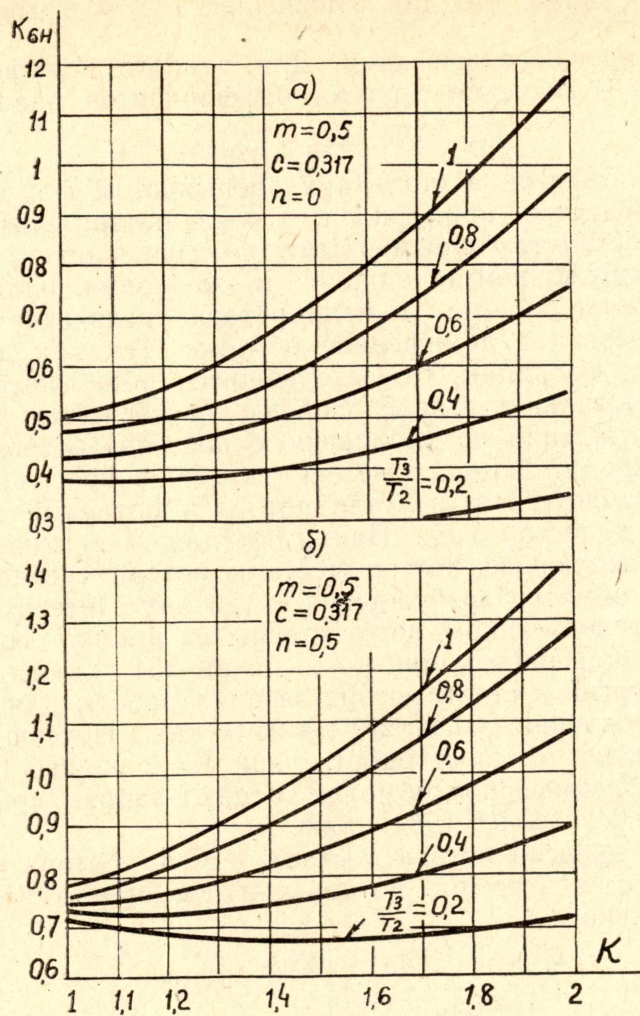


Рис. 4. Зависимость отношения энергии потерь в обмотке возбуждения при прерывистом и постоянном возбуждении от К

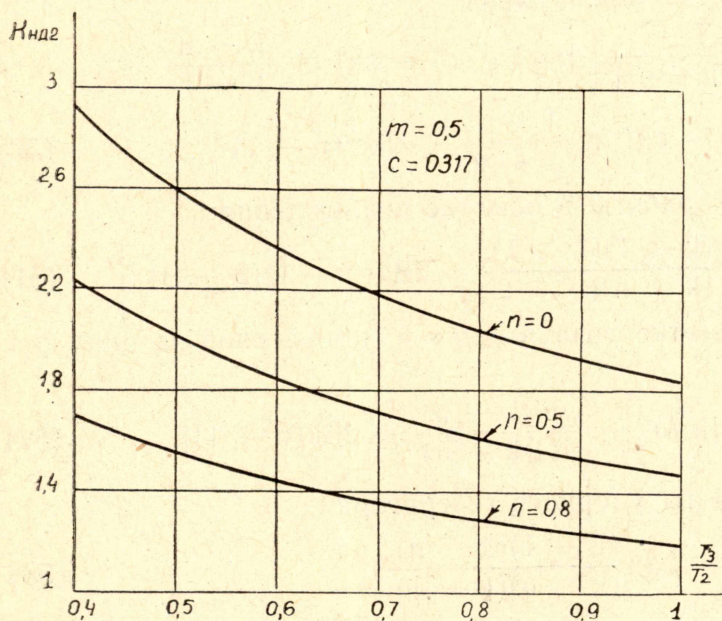


Рис. 5. К расчету допустимого коэффициента форсировки с учетом насыщения



Из рис. 5 видно, что для отношения  $\frac{T_3}{T_2} = 0,8$  допустимый коэффициент форсировки равен двум. Для данного коэффициента форсировки при  $n=0$ , значения других коэффициентов равны:

$$k_{4H} = 0,34; k_{5H} = 1,9; k_{6H} = 1,$$

то есть потери энергии в стали при прерывистом форсированном возбуждении сократятся примерно в 3 раза, потери энергии в обмотке возбуждения останутся неизменными по сравнению с потерями при постоянном возбуждении за одно и то же время, однако, при этом суммарные потери энергии в меди ротора увеличатся в 1,9 раза за счет потерь энергии в демпферной обмотке. Так как демпферная обмотка не имеет изоляции, то выделившиеся в ней потери перейдут в тело ротора. Возникает вопрос: сильнее ли нагреется ротор при прерывистом возбуждении по сравнению с постоянным возбуждением за одно и то же время? Чтобы ответить на этот вопрос, надо знать соотношение между потерями в стали ротора и потерями в обмотке возбуждения при холостом ходе. Например, для генератора ТИ-100-2 это соотношение следующее: потери в стали ротора составляют 281 квт, потери в меди обмотки возбуждения — 120 квт. Потери энергии в стали ротора при постоянном возбуждении за время, соответствующее длительности цикла работы при  $K=2$ , равны  $281 t_{ц}$  кдж.

Потери энергии в стали ротора за цикл работы для  $K=2$  при прерывистом возбуждении —  $0,34 \cdot 281 t_{ц} \approx 95 t_{ц}$  кдж. Потери энергии в обмотке возбуждения за цикл работы при  $K=2$  равны  $120 t_{ц}$  кдж. Потери энергии в демпферной обмотке за цикл работы при прерывистом возбуждении —  $0,9 \cdot 120 t_{ц} = 108 t_{ц}$  кдж.

Отношение энергии потерь в стали и меди ротора при прерывистом возбуждении к энергии потерь при постоянном возбуждении за цикл работы равно:

$$\frac{95t_{ц} + 108t_{ц} + 120t_{ц}}{281t_{ц} + 120t_{ц}} = 0,8. \quad (49 \text{ а})$$

Таким образом, при прерывистом возбуждении потери энергии в роторе будут на 20 проц. меньше, чем при постоянном возбуждении за то же самое время.

При  $n \geq m$  работа машины происходит на втором участке характеристики холостого хода. В этом случае суммарные потери, выделяющиеся в стали машины за цикл, равны:

$$Q_{с\beta n} = \frac{P'_0 T_\beta}{[c + m(1 - c)]^2} \left\{ [m(1 - c) + ck]^2 \ln \frac{k - n}{k - 1} + [m(1 - c) - ck]^2 \ln \frac{k + 1}{k + n} + 2kc^2(n - 1) \right\}. \quad (50)$$

Потери энергии за цикл работы в обмотке возбуждения:

$$Q_{mbц} = \frac{u_2^2 \cdot T_\beta}{r_2} \left[ k^2 \ln \frac{(k + 1)(k - 1)}{(k + n)(k - 1)} + 2Bk(n - 1)(2 - B) \right]. \quad (51)$$

Суммарные потери в обмотке возбуждения и демпферной за цикл работы

$$Q_{mц} = \frac{u_2^2}{r_2} T_\beta [k^2 \ln \frac{(k + 1)(k - n)}{(k - 1)(k + n)} + 2Bk(n - 1)] \quad (52)$$

Длительность цикла работы ударного генератора

$$t_{ц} = T_\beta \ln \frac{(k + 1)(k - n)}{(k + n)(k - 1)} \quad (53)$$



Зависимость отдельных составляющих потерь энергии при прерывистом и постоянном возбуждении за одно и то же время для различных коэффициентов форсировки можно представить аналогично уравнениям (45÷49).

Для стали

$$k_{\text{чн}} = \frac{[m(1-c) + ck]^2 \ln \frac{k-n}{k-1} + [m(1-c) - ck]^2 \ln \frac{k+1}{k+n} + [c + m(1-c)]^2 \ln \frac{(k+1)(k-n)}{(k+n)(k-1)} + 2c^2(n-1)k}{- \rightarrow} \quad (54)$$

Для энергии потерь в обмотке возбуждения и демпферной

$$k_{5H} = k^2 + \frac{2Bk(n-1)}{\ln \frac{(k+1)(k-n)}{(k-1)(k+n)}} \quad (55)$$

Для энергии потерь в обмотке возбуждения

$$k_{6H} = k^2 + \frac{2Bk(n-1)(2-B)}{\ln \frac{(k+1)(k-n)}{(k-1)(k+n)}} \quad (56)$$

Допустимый коэффициент форсировки можно определить из условия равенства энергий потерь в меди обмотки возбуждения при постоянном и прерывистом возбуждении за одно и то же время:

$$(k^2 - 1) \ln \frac{(k+1)(k-n)}{(k-1)(k+n)} + 2Bk(n-1)(2-B) = 0. \quad (57)$$

Результаты расчета по (57) представлены на рис. 5 для  $n=0,8$ .

Необходимо оценить погрешность, которая получается при расчете длительности цикла без учета насыщения ( $L_\alpha$ ) и при учете насыщения выбором насыщенных значений параметров для заданного режима ( $L_{\alpha \text{ср}}$ ) с длительностью цикла, рассчитанной с учетом насыщения путем замены характеристики холостого хода машины двумя прямыми линиями.

Длительность цикла без учета насыщения

$$t_{\text{ц1}} = T_\alpha \ln \frac{(k+1)(k-n)}{(k-1)(k+n)} \quad (58)$$

Длительность цикла при учете насыщения выбором насыщенных значений параметров для заданного режима:

$$t_{\text{ц2}} = T_{\alpha \text{ср}} \ln \frac{(k+1)(k-n)}{(k-1)(k+n)} \quad (59)$$

Длительность цикла  $t_{\text{ц}}$  при аппроксимации характеристики холостого хода двумя прямыми линиями при  $0 \leq n \leq m$  определяется по (44). При  $K=2$ ;  $n=0$ ;  $m=0,5$ ;  $c=0,317$ :

$$\frac{t_{\text{ц1}}}{t_{\text{ц}}} = 1,8; \quad \frac{t_{\text{ц2}}}{t_{\text{ц}}} = 1,14. \quad (59 \text{ а})$$

Погрешность расчета длительности цикла дополнительно возрастает, если форсировка начинается не с нулевого напряжения, а с некоторого заданного, например, при  $n \geq m$ .



В этом случае при расчете длительности цикла методом аппроксимации характеристики холостого хода двумя прямыми постоянная времени определяется углом наклона  $\beta$  характеристики холостого хода (рис. 1).

$$t_{цз} = T_{\beta} \ln \frac{(k+1)(k-n)}{(k-1)(k+n)} \quad (60)$$

Тогда для рассматриваемого случая вместо  $\frac{t_{ц2}}{t_{ц}} = 1,14$  получим

$$\frac{t_{ц2}}{t_{цз}} = 2. \quad (61)$$

В расчетах были приняты значения углов, соответствующих характеристикам холостого хода существующих генераторов разрывной мощности [4]:

$$\beta = 54^\circ; \quad \alpha_{ср} = 70^\circ; \quad \alpha = 77^\circ.$$

Таким образом, при исследовании прерывистого возбуждения ударного генератора необходимо учитывать насыщение магнитной цепи, при этом в случае расчета длительности цикла прерывистого возбуждения необходимо учитывать насыщение путем аппроксимации характеристики холостого хода по меньшей мере двумя отрезками прямых линий, а при расчете допустимого коэффициента форсировки достаточно учитывать насыщение магнитной цепи выбором насыщенных значений параметров для заданного режима.

Применение прерывистого возбуждения при допустимых коэффициентах форсировки позволяет значительно сократить потери холостого хода в расчете на один импульс тока статора по сравнению с тем случаем, когда возбуждение осуществляется непрерывно. Эффективность применения форсированного прерывистого возбуждения тем больше, чем меньше отношение постоянной времени демпферной обмотки к постоянной времени обмотки возбуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Сипайлов, А. И. Верхотуров. Влияние форсировки возбуждения на величину потерь энергии ударного генератора. См. статью в этом же сборнике.
2. О. Б. Брон. Автоматы гашения магнитного поля, Госэнергоиздат, 1961.
3. Н. Н. Никифорский. К вопросу о форсированном развозбуждении синхронных машин, «Электричество», 1963, № 9.
4. L. A. Kilgore, E. J. Hill, C. Flick. A new three—million Kva short circuit generator I.E.E.E. Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 67, 1963.