

**ЭНЕРГЕТИКА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ  
ВКЛЮЧЕНИИ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ УДАРНОГО  
ГЕНЕРАТОРА НА ПОСТОЯННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ**

А. И. ВЕРХОТУРОВ, Г. С. СИПАЙЛОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

В ударных генераторах, особенно при прерывистом режиме возбуждения, обмотки ротора работают в переходных режимах, при этом важно, чтобы подъем напряжения от нуля до заданного значения сопровождался выделением в обмотках ротора минимальных потерь.

В данной статье ставится задача определить условия, при которых нарастание напряжения от нуля до заданного значения происходит с выделением минимальных потерь в обмотках ротора.

Для решения поставленной задачи рассмотрим энергетику протекания переходного процесса при включении обмотки возбуждения ударного генератора на постоянное напряжение  $U_2$ , при этом для упрощения принимаем, что магнитная проницаемость стали постоянна, а коэффициент связи между контурами ротора равен единице.

Переходный процесс, протекаемый в обмотках ротора, описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \sqrt{L_2 \cdot L_3} \frac{di_3}{dt} &= U_2 \\ i_3 r_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + \sqrt{L_2 \cdot L_3} \frac{di_2}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где

$r_2, L_2$  — параметры обмотки возбуждения с учетом возбудителя,

$r_3, L_3$  — параметры демпферной обмотки.

Выражения для токов имеют вид:

$$i_2 = \frac{U_2}{r_2} \left( 1 - B e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (2)$$

$$i_3 = -\frac{U_2}{r_2} (1 - B) e^{-\frac{t}{T}}, \quad (3)$$

где

$T = T_2 + T_3$  — суммарная постоянная времени контуров ротора,

$$B = \frac{T_2}{T} = \frac{1}{1 + \frac{T_3}{T_2}} \text{ — величина, зависящая от отношения постоянных}$$

времени демпферной обмотки и обмотки возбуждения.

Потокосцепление с обмоткой статора пропорционально суммарному току обмоток ротора и коэффициенту взаимоиндукции между ротором и статором  $M_{12}$ :

$$\Psi = \frac{U_2}{r_2} M_{12} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (4)$$

Мощность, подводимая к обмотке возбуждения, равна:

$$P = u_2 \cdot i_2 = \frac{u_2^2}{r_2} \left( 1 - B e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (5)$$

Часть этой мощности преобразуется в электромагнитную и идет для создания поля возбуждения:

$$P_M = u_m \cdot i = \frac{u_2^2}{r_2} B e^{-\frac{t}{T}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (6)$$

где

$$u_m = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{u_2 M_{12}}{r_2 T} e^{-\frac{t}{T}} \approx u_2 B e^{-\frac{t}{T}}. \quad (7)$$

Исследование уравнения (6) показывает, что  $P_M$  достигает максимума при  $t = 0,693T$ . Оставшаяся часть  $(P - P_M)$  выделяется в виде тепла в обмотке возбуждения и демпферной

$$P_2 = i_2^2 \cdot r_2 = \frac{u_2^2}{r_2} \left( 1 - B e^{-\frac{t}{T}} \right)^2 \quad (8)$$

$$P_3 = i_3^2 \cdot r_3 = \frac{u_2^2}{r_2} B(1 - B) e^{-\frac{2t}{T}}. \quad (9)$$

Мгновенное значение к.п.д. преобразования энергии электрического поля в энергию магнитного поля равно

$$\eta = \frac{P_M}{P} = \frac{B e^{-\frac{t}{T}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)}{1 - B e^{-\frac{t}{T}}}. \quad (10)$$

Исследуем выражение для  $\eta_M$  на условие максимума:

$$\frac{d\eta_M}{dt} = B e^{-\frac{2t}{T}} - 2e^{-\frac{t}{T}} + 1 = 0. \quad (11)$$

Решив уравнение (11), получим время, при котором  $\eta_M$  достигает максимума

$$t_M = T \ln \frac{B}{1 \pm \sqrt{1-B}} \quad (12)$$

В последнем выражении величина  $B$  может меняться от единицы (машина без демпферной обмотки) до нуля (постоянная времени демпферной обмотки равна бесконечности  $r_3=0$ ).

Так как в нашем случае время отрицательным быть не может, то получаем одно значение для  $t_M$  с положительным значением корня:

$$t_M = T \ln \frac{B}{1 - \sqrt{1-B}} \quad (13)$$

Результаты расчетов по (13) показывают, что при изменении  $\frac{T_3}{T_2}$  от нуля до единицы величина  $t_M$  изменяется от 0 до  $0,536T$  соответственно.

Для характеристики переходного процесса в целом введем понятие энергетического коэффициента преобразовательного процесса

$$\eta_э = \frac{\int_0^t P_M \cdot dt}{\int_0^t P \cdot dt} = \frac{0,5 \cdot B \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)^2}{t \cdot T^{-1} + B \left(e^{-\frac{t}{T}} - 1\right)} \quad (14)$$

Результаты расчетов по уравнению (14) представлены на рис. 1,а. Кривые зависимости  $\eta_э$  от времени имеют экстремальный характер. Величину максимума к.п.д. можно найти, если приравнять нулю производную от  $\eta_э$  по времени:

$$\frac{d\eta_э}{dt} = \ln \left( \frac{2t}{T} + B e^{-\frac{2t}{T}} + B + 1 \right) - \frac{t}{T} = 0. \quad (15)$$

Трансцендентное уравнение (15) можно решить приближенно с любой степенью точности относительно времени при известных значениях  $B$ . Результаты решения уравнения представлены на рис. 1. На рис. 2 а и б для сравнения представлены зависимости к.п.д., мощности, напряжения и потерь, выделяемых в обмотках ротора, от времени, для машины без демпферной обмотки  $\frac{T_3}{T_2} = 0$  и с демпферной обмоткой  $\frac{T_3}{T_2} = 1$ .

Анализируя кривые рис. 2,а, можно сделать следующие выводы относительно нефорсированного протекания переходного процесса при включении обмотки возбуждения на напряжение  $u_2$  при отсутствии демпферной обмотки  $\frac{T_3}{T_2} = 0$ :

- а) мощность, развиваемая источником питания в начале переходного процесса, значительно меньше его номинальной мощности;
- б) к.п.д. процесса преобразования электрической энергии в энергию магнитного поля высок только в начале нарастания магнитного потока;
- в) для повышения к.п.д. процесса преобразования электрической энергии возбудителя в энергию магнитного поля необходимо форсировать переходные процессы, при этом чем быстрее будет протекать переходный процесс, тем выше к.п.д. преобразования.

При наличии демпферной обмотки энергетика протекания переходного процесса несколько другая (рис. 2,б). Поскольку коэффициент связи между контурами равен единице, то мощность источника в нача-

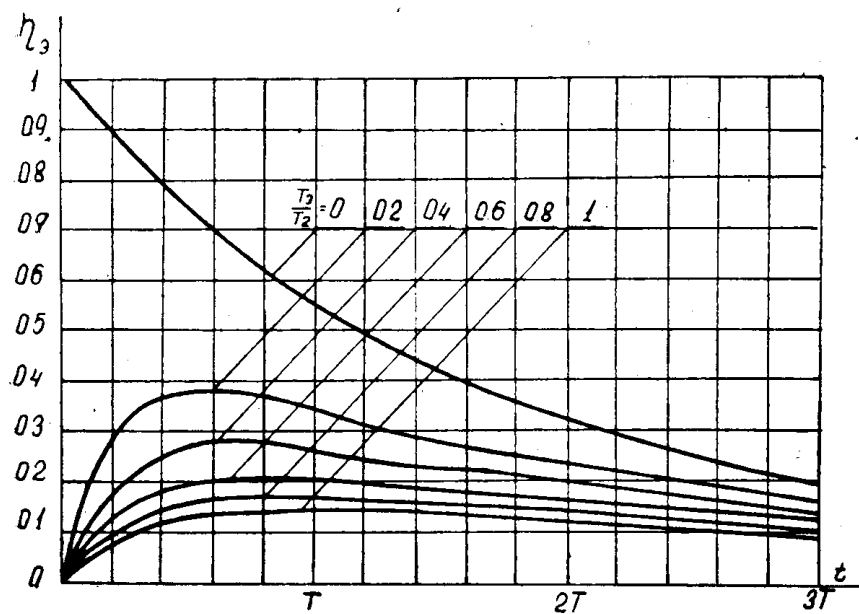
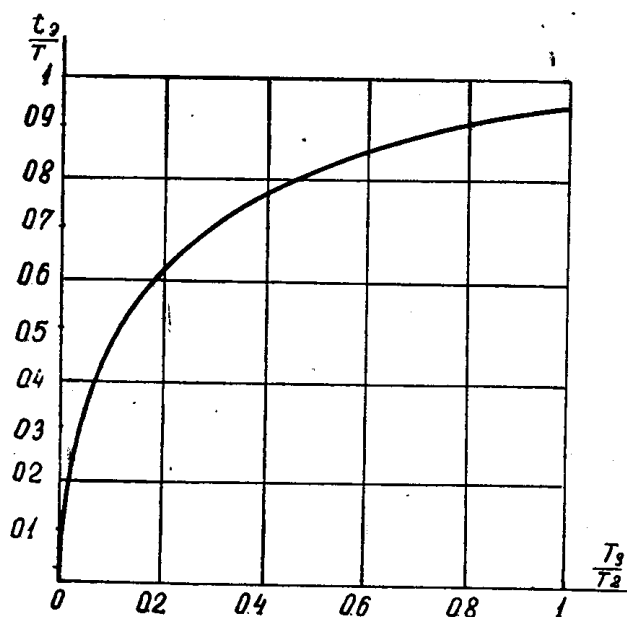


Рис. 1. а) Зависимость  $\eta_3$  от времени для различных отношений  $\frac{T_3}{T_2}$



б) К определению времени достижения максимальных значений  $\eta_3$

ле процесса нарастает быстро, однако она тратится на покрытие потерь в демпферной обмотке. К. п. д. преобразования электрической энергии в энергию магнитного поля в начале процесса (при  $t=0$ ) равен нулю, затем достигает максимума, после чего снова уменьшается. Необходимо отметить, что чем мощнее демпферная обмотка, тем ниже для одного и того же времени к.п.д. преобразования электрической энергии в энергию магнитного поля (рис. 2,б).

Таким образом, при наличии демпферной обмотки и нефорсированном протекании переходного процесса в энергию магнитного поля пре-

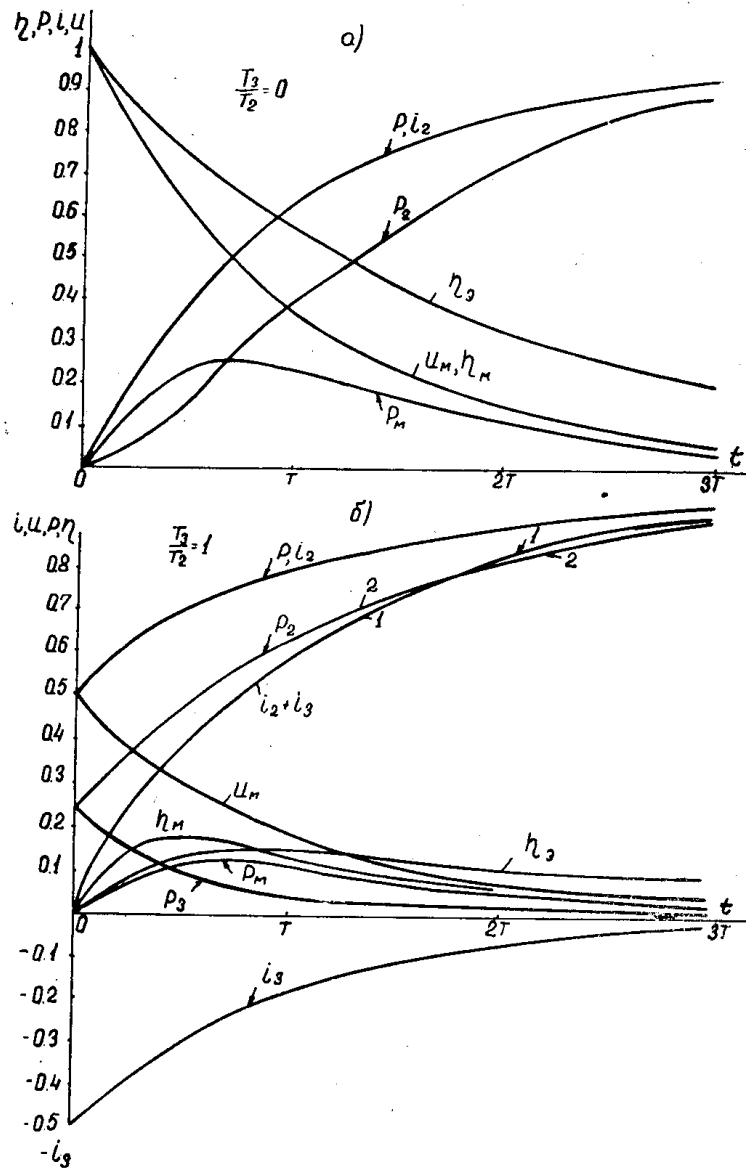


Рис. 2. Характеристики протекания переходного процесса в машинах без демпферной обмотки (а) и с демпферной обмоткой (б)

образуется всего 9 проц. при  $\frac{T_3}{T_2} = 1$  и до 17 проц. при  $\frac{T_3}{T_2} = 0,2$  электрической энергии возбудителя. Если форсировать переходный процесс, то к.п.д. можно повысить от 15 проц. при  $\frac{T_3}{T_2} = 1$  до 39 проц. при  $\frac{T_3}{T_2} = 0,2$ .

Исследования показали, что одним из наиболее эффективных способов ускорения переходных процессов для генераторов с демпферной обмоткой является ускорение путем повышения потолка возбуждения. При данном способе ускорения переходных процессов система дифференциальных уравнений включения обмотки возбуждения на постоянное напряжение будет аналогична (1), если вместо  $u_2$  поставить  $ku_2$ . Выражения для токов получат вид:

$$i_2 = \frac{ku_2}{r_2} \left( 1 - \text{Be}^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (16)$$

$$i_3 = -\frac{ku_2}{r_2} (1 - B) e^{-\frac{t}{T}}, \quad (17)$$

где  $k$  — кратность напряжения, подводимого к обмотке возбуждения по сравнению с номинальным.

Умножив суммарный ток обмоток ротора на коэффициент взаимной индуктивности между ротором и статором  $M_{12}$ , получим выражение для суммарного потокосцепления

$$\psi = \frac{ku_2}{r_2} M_{12} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (18)$$

Время нарастания потока до заданной величины можно определить из условия равенства суммарного тока обмоток величине  $\frac{u_2}{r_2}$ , откуда

$$t = T \ln \frac{k}{k-1}, \quad (19)$$

Выражение (19) при  $k=1$  обращается в бесконечность, т. е. без форсировки возбуждения поток достигает установившегося значения за  $= \infty$ . В практических расчетах принимают, что поток до установившегося значения нарастает за время  $t=3T$ , тогда выражение (19) можно переписать в таком виде:

$$t' = T \ln \frac{k}{k-0,95}. \quad (20)$$

Чтобы получить зависимость энергетического к.п.д. в функции от коэффициента форсировки, нужно в выражение (14) вместо  $t$  подставить его значение из (19), тогда после преобразования получим

$$\eta_3 = \frac{0,5}{k^2 T_n \frac{k}{k-1} - Bk}. \quad (21)$$

Выражение (21) имеет смысл для всех  $k$ , кроме  $k=1$ . Чтобы вычислить  $\eta_3$  при  $k=1$ , нужно в выражение (14) вместо  $t$  подставить его значение из (20). Результаты расчетов по (21) представлены на рис. 3а. Из кривых рис. 3а видно, что с повышением кратности форсировки  $\eta_3$  сначала повышается, достигает максимума и при дальнейшем увеличении  $k$  уменьшается. Для одного и того же  $k$  энергетический к.п.д. тем выше, чем меньше отношение  $\frac{T_3}{T_2}$ . Величину коэффициента форсировки  $k$ , при котором  $\eta_3$  достигает максимума, можно определить, если приравнять  $\frac{d\eta_3}{dk}$  к нулю:

$$2k \ln \frac{k}{k-1} - \frac{k}{k-1} - B = 0. \quad (22)$$

Результаты приближенного решения трансцендентного уравнения пред-

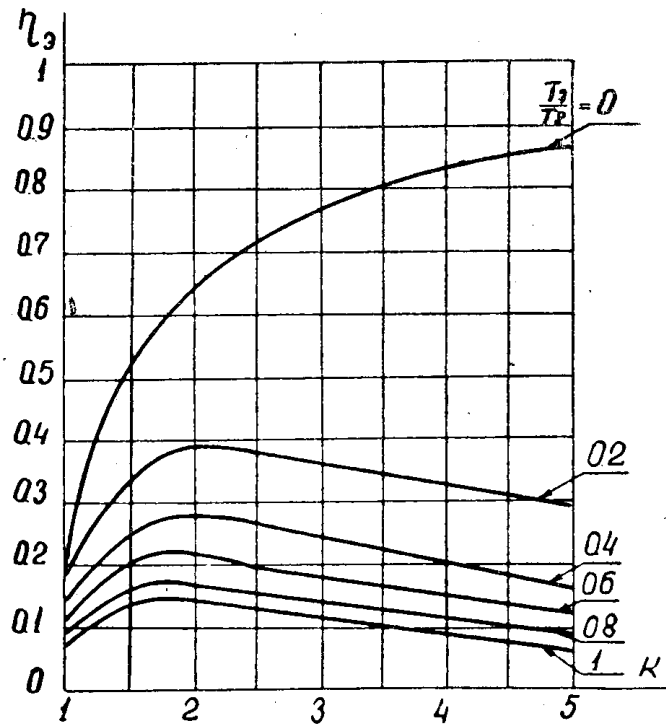
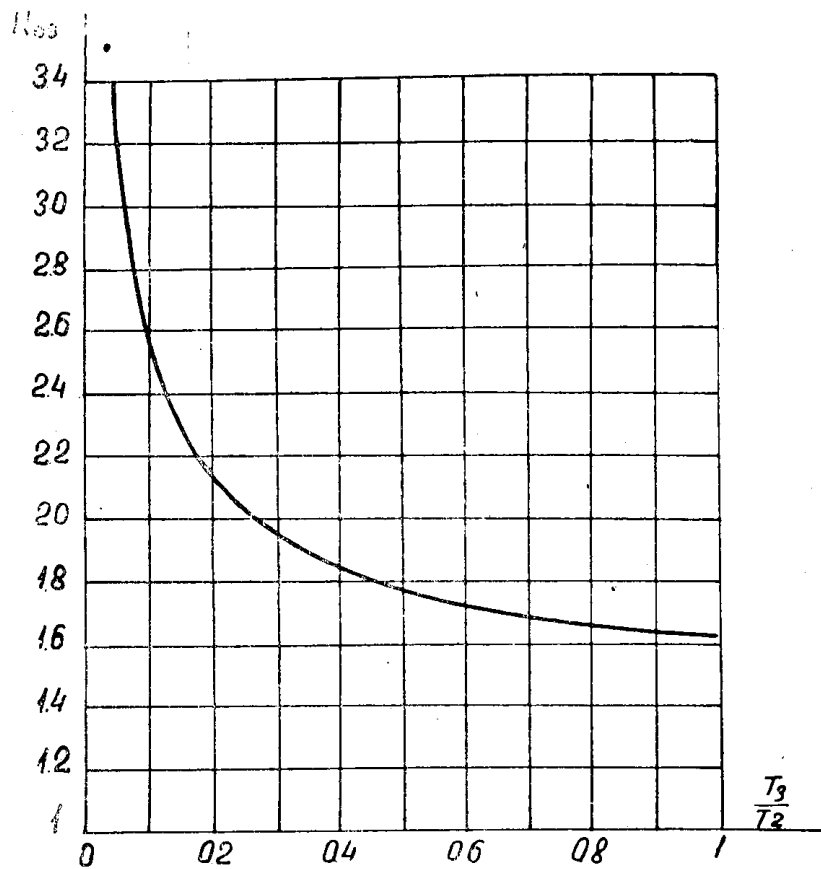


Рис. 3. а) Зависимость  $\eta_3$  от коэффициента форсировки



б) К определению оптимальных значений коэффициентов форсировки из условия минимума потерь в обмотках ротора

ставлены на рис. 3 б для различных отношений  $\frac{T_3}{T_2}$ . Коэффициент форсировки, при котором  $\eta$ , достигает максимальной величины, обозначим через  $K_{оп}$ .

Таким образом, в машинах с демпферной обмоткой электрическую энергию возбудителя можно преобразовать в энергию магнитного поля с наименьшими электрическими потерями в обмотках ротора только при определенном коэффициенте форсировки.

Можно показать, что при нарастании магнитного потока от нуля до заданного значения потери в обмотках ротора при оптимальном коэффициенте форсировки будут действительно меньше, чем при любом другом коэффициенте форсировки. Для этого выразим энергию потерь в обмотках ротора в зависимости от коэффициента форсировки

$$Q_{фк} = \int_0^t i_2^2 \cdot r_2 \cdot dt + \int_0^t i_3^2 \cdot r_3 \cdot dt = -\frac{u_2^2 \cdot T}{r_2} \left( k^2 \ln \frac{k-1}{k} + V_k + 0,5B \right). \quad (23)$$

Если в уравнение (23) вместо  $t$  подставить  $t'$  из (20), то выражение для энергии потерь в обмотках ротора при нарастании потока от нуля до заданного значения примет вид

$$Q'_{фк} = -\frac{u_2^2 T}{r_2} \left( k^2 \ln \frac{k-0,95}{k} + 0,95V_k + 0,45B \right). \quad (24)$$

Обозначим через  $k_{фм}$  отношение энергии потерь в обмотках ротора при форсировке к энергии потерь в них при  $k=1$ , тогда

$$k_{фм} = \frac{k^2 \ln \frac{k}{k-0,95} + 0,95V_k + 0,45B}{1,4B - 3}. \quad (25)$$

Результаты расчетов по (25) представлены на рис. 4 для различных отношений  $\frac{T_3}{T_2}$ . Как видно из рис. 4, кривые имеют экстремальный характер. Чтобы найти коэффициент форсировки, при котором потери будут минимальными, необходимо взять первую производную от  $Q_{фк}$  по  $k$  и приравнять ее нулю:

$$2k \ln \frac{k}{k-1} - \frac{k}{k-1} - B = 0. \quad (26)$$

Это уравнение в точности совпадает с уравнением (22), откуда следует, что при оптимальном коэффициенте форсировки потери в обмотках ротора будут минимальными.

Таким образом, при нарастании напряжения на зажимах генератора от нуля до заданного значения в машинах с демпферной обмоткой можно выбрать такой коэффициент форсировки, при котором преобразование электрической энергии возбудителя в энергию магнитного поля возбуждения машины будет происходить с наименьшими электрическими потерями, выделяемыми в обмотках ротора. При этом энергетический к.п.д. преобразования электрической энергии возбудителя в энергию магнитного поля при оптимальном коэффициенте форсировки будет примерно в 2 раза выше, чем при протекании переходного процесса при  $k=1$ .

Если принять, что при нарастании напряжения на зажимах генератора от нуля до заданного значения при оптимальном коэффициенте форсировки в обмотках ротора выделяется такое же количество потерь, как и при  $k=1$ , то при работе с оптимальным коэффициентом



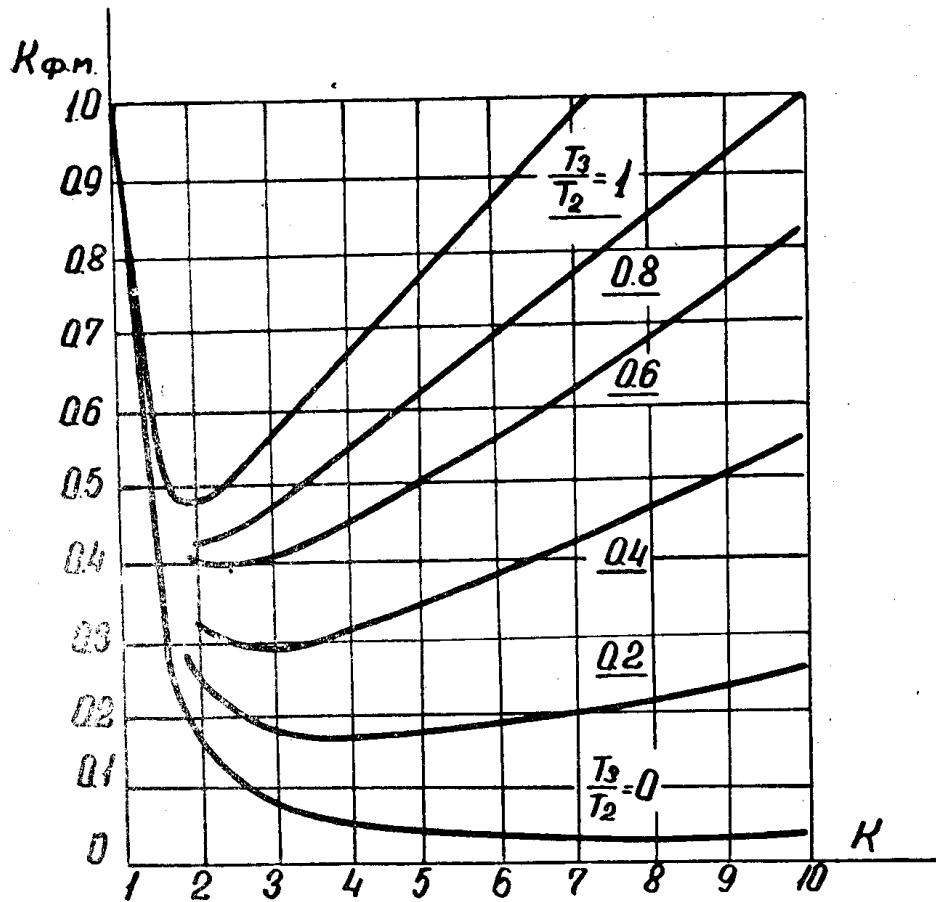


Рис. 4. Зависимость  $k_{фм}$  от коэффициента форсировки

форсировки можно возбуждать машину до более высокого напряжения, чем при  $k=1$ , и тем самым значительно повысить ударную мощность генератора, которая зависит от квадрата напряжения.