

## ВЛИЯНИЕ ФОРСИРОВКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, А. И. ВЕРХОТУРОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Генераторы ударной мощности, нормальным режимом работы которых является включение на время, примерно равное одному периоду э. д. с. на нагрузку с небольшим сопротивлением, соизмеримым с величиной сверхпереходного индуктивного сопротивления генератора, при непрерывном возбуждении имеют более высокие электромагнитные потери холостого хода по сравнению с турбогенераторами такой же габаритной мощности. Поэтому при длительной работе ударного генератора даже на холостом ходу он может перегреваться, и для генераторов разрывной и ударной мощности специально устанавливается максимально допустимое время работы на холостом ходу при номинальном напряжении, например, для генератора разрывной мощности фирмы ASEA (Швеция) с симметричной мощностью короткого замыкания 2500 Мва максимально допустимое время равно 10 мин. [1].

Для сокращения потерь энергии холостого хода в таких генераторах при интервалах между импульсами тока 15—30 мин. напряжение снижается до нуля на период бестоковой паузы [2].

Целесообразность применения прерывистого возбуждения при паузах между импульсами тока статора больше, чем длительность цикла при прерывистом возбуждении без форсировки очевидна, так как потери энергии холостого хода, выделяющиеся в генераторе за такой промежуток времени, при постоянном возбуждении будут много больше, чем при прерывистом возбуждении без форсировки.

Для ударных генераторов могут встречаться такие режимы, когда длительность пауз между импульсами меньше или равна длительности цикла при прерывистом возбуждении без форсировки. Поэтому необходимо оценить возможность применения форсированного прерывистого возбуждения в таких режимах.

В данной статье рассматривается часть прерывистого возбуждения — форсированное нарастание магнитного потока от нуля или другого конечного значения до заданного.

При машинной системе возбуждения форсировку значительно удобнее производить на стороне возбуждения возбудителя.

При расчетах же будем предполагать, что форсировка осуществляется непосредственно в цепи ротора. Такое допущение оправдано тем, что постоянная времени возбудителя  $T_B$  значительно меньше суммарной постоянной контуров ротора.

Для установления указанных зависимостей рассмотрим переходный процесс включения обмотки возбуждения на постоянное напряжение  $ku_2$ :

$$\left. \begin{aligned} i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} &= k u_2 \\ i_3 r_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где

$r_2, L_2$  — параметры обмотки возбуждения,

$r_3, L_3$  — параметры демпферной обмотки.

$M_{23}$  — взаимоиндуктивность обмоток ротора.

Допустим, что коэффициент связи между обмотками равен или близок к единице. Для турбогенераторов значение этого коэффициента равно 0,96 [3].

В этом случае  $M_{23} = \sqrt{L_2 L_3}$  и выражения для токов имеют вид:

$$i_2 = \frac{k u_2}{r_2} + A e^{-\frac{t}{T}}, \quad (2)$$

$$i_3 = \frac{r_2 L_3 A}{r_3 \sqrt{L_2 L_3}} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (3)$$

где  $T = T_2 + T_3$  — суммарная постоянная времени контуров ротора. Постоянная интегрирования  $A$  определяется из условия равенства суммы токов в обеих обмотках величине  $n \frac{u_2}{r_2}$  при  $t=0$ .

$$i_2 + i_3 = \frac{k u_2}{r_2} + A + \frac{r_2 L_3 A}{r_3 \sqrt{L_2 L_3}} = n \frac{u_2}{r_2}, \quad (4)$$

где  $n$  — коэффициент, показывающий, с какого значения тока возбуждения начинается форсировка, величина этого коэффициента изменяется в пределах  $0 \leq n \leq 1$ , откуда

$$A = \frac{k u_2 r_3 \sqrt{L_2 L_3} (n - k)}{r_2 (r_3 \sqrt{L_2 L_3} + r_2 L_3)}. \quad (5)$$

Когда анализ производится в относительных единицах, то  $L_2 \approx L_3$  и выражение для  $A$  существенно упрощается.

$$A = \frac{k u_2 B (n - k)}{r_2}, \quad (6)$$

где

$$B = \frac{\delta_3}{\delta_2 + \delta_3} = \frac{T_2}{T}.$$

После подстановки постоянной интегрирования в выражения для токов получим:

$$i_2 = \frac{u_2}{r_2} \left[ k + (n - k) B e^{-\frac{t}{T}} \right] \quad (7)$$

$$i_3 = \frac{u_2}{r_2} (n - k) (1 - B) e^{-\frac{t}{T}}. \quad (8)$$

Сумма токов в обмотках

$$i_2 + i_3 = \frac{u_2}{r_2} \left[ k + (n - k)e^{-\frac{t}{T}} \right] \quad (9)$$

Поток, который электромагнитным путем передается из ротора в статор, пропорционален суммарному току обмоток и коэффициенту взаимной индукции между ротором и статором  $M_{12}$ :

$$\Phi = \Phi_0 \left[ k + (n - k)e^{-\frac{t}{T}} \right], \quad (10)$$

$$\Phi_0 = \frac{u_2 M_{12}}{r_2 W_1}$$

$W_1$  — число витков обмотки статора.

Время нарастания потока до установившегося значения можно определить из условия равенства суммарного тока обмоток величине  $\frac{u_2}{r_2}$ :

$$\frac{u_2}{r_2} \left[ k + (n - k)e^{-\frac{t}{T}} \right] = \frac{u_2}{r_2}, \quad (11)$$

откуда

$$t = T \ln \frac{k - n}{k - 1} \quad (12)$$

Выражение (12) при  $k=1$  обращается в бесконечность, т. е. без форсировки возбуждения поток достигает установившегося значения за  $t = \infty$ . В практических расчетах принимают, что поток до установившегося значения нарастает за время  $t = 3T$ , тогда выражение (12) можно переписать в таком виде:

$$t' = T \ln \frac{k - n}{k - 0,95}. \quad (13)$$

Потери энергии в стали машины пропорциональны квадрату потока. Зная установившийся поток холостого хода и потери в стали, соответствующие этому потоку, можно подсчитать потери, соответствующие любому другому значению потока. Поэтому потери, выделяющиеся в стали машины за промежуток времени  $t$  при форсированном возбуждении, можно вычислить:

$$Q_{сф} = \frac{P'_0}{\Phi_0^2} \int_0^t \Phi dt = P'_0 T \left[ (n - 1)(k + 0,5n + 0,5) - k^2 \ln \frac{k - 1}{k - n} \right]. \quad (14)$$

Зная закон изменения тока в обмотке возбуждения и демпферной по времени, можно определить потери, выделяющиеся в этих обмотках при любом коэффициенте форсировки  $k$  за время  $t$ .

Для обмотки возбуждения

$$Q_{2к} = \int_0^t i_2^2 r_2 dt = \frac{u_2^2 T}{r_2} \left\{ B(n - 1)[2k + B(0,5n - k + 0,5)] - k^2 \ln \frac{k - 1}{k - n} \right\} \quad (15)$$

Для демпферной обмотки

$$Q_{3к} = \int_0^t i_3^2 r_3 dt = \frac{u_2^2}{r_2} (1 - B) V T (n - 1) (0,5n + 0,5 - k). \quad (16)$$

Суммарные потери в обмотках ротора можно получить, сложив правые части уравнений (15) и (16).

$$Q_{Фк} = \frac{u_2^2}{r_2} T \left[ B(n - 1)(k + 0,5n + 0,5) - k^2 l n \frac{k - 1}{k - n} \right]. \quad (17)$$

Если в уравнения (14), (15), (16) и (17) подставить вместо  $t$  значение  $t^1$  из (13), то уравнения для энергии потерь в стали, обмотке возбуждения и демпферной можно записать соответственно:

$$Q'_{сф} = P'_0 T \left[ (n - 0,9)(k + 0,5n + 0,475) - k^2 l n \frac{k - 0,95}{k - n} \right] \quad (18)$$

$$Q'_{2к} = \frac{u_2^2}{r_2} T \left\{ B(n - 0,95)[2k + V(0,5n + 0,5 - k)] - k^2 l n \frac{k - 0,95}{k - n} \right\} \quad (19)$$

$$Q'_{3к} = \frac{u_2^2}{r_2} T (0,5n + 0,5 - k) V (1 - B) (n - 0,95). \quad (20)$$

Суммарные потери энергии, выделяющиеся в обмотках ротора за время  $t^1$ , можно получить, сложив правые части уравнений (19) и (20):

$$Q'_{Фк} = \frac{u_2^2}{r_2} T \left[ B(n - 0,95)(k + 0,5n + 0,5) - k^2 l n \frac{k - 0,95}{k - n} \right], \quad (21)$$

Для того чтобы доказать целесообразность применения форсировки возбуждения для сокращения потерь энергии холостого хода в расчете на один импульс тока статора, необходимо сравнить потери энергии в стали машины и в меди обмоток ротора при форсированном возбуждении и при постоянном возбуждении за одно и то же время, но для различных коэффициентов форсировки.

Обозначим  $k_{4ф} = \frac{Q_{сф}}{P'_0 t}$ , где  $P'_0 t$  — потери энергии холостого хода в стали при постоянном возбуждении за время  $t$ , тогда

$$k_{4ф} = k^2 + \frac{(n - 1)(k + 0,5n + 0,5)}{l n \frac{k - n}{k - 1}}. \quad (22)$$

Результаты расчета по (22) представлены на рис. 1 для  $n=0$  и  $n=0,5$ . Из рисунка видно, что с ростом коэффициента форсировки потери энергии в стали уменьшаются и при  $k=2$ ,  $n=0$  потери в 2,8 раза меньше потерь энергии в стали при холостом ходе и постоянном возбуждении. С дальнейшим увеличением коэффициента форсировки уменьшение энергии потерь происходит в меньшей степени.

Отношение энергии потерь при прерывистом и постоянном возбуждении в обмотке возбуждения и демпферной за одно и то же время обозначим через  $k_{5ф}$ :

$$k_{5ф} = \frac{Q_{Фк}}{\frac{u_2^2}{r_2} t} = k^2 + \frac{B(n - 1)(k + 0,5n + 0,5)}{l n \frac{k - n}{k - 1}}. \quad (23)$$

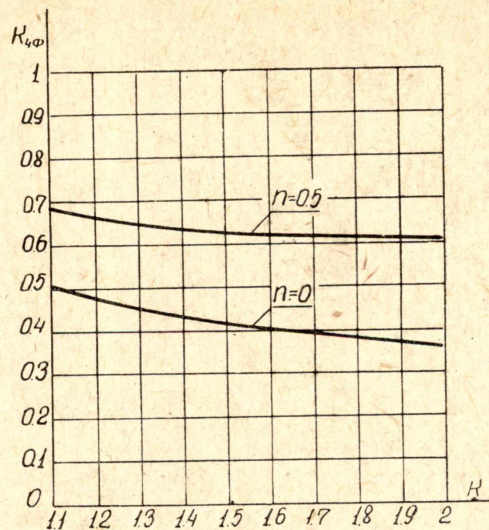


Рис. 1. Зависимость  $k_{4ф}$  от коэффициента форсировки

Результаты расчета по (23) представлены на рис. 2, а и б при  $n=0$  и  $n=0,5$  для различных отношений постоянных времени обмотки возбуждения и демпферной. Расчеты показывают, что с ростом коэффициента форсировки суммарные потери энергии в обмотках ротора увеличиваются, однако, при низких значениях коэффициентов форсировки потери энергии меньше, чем при постоянном возбуждении; с дальнейшим ростом коэффициента форсировки наступает такой момент, когда потери при форсированном возбуждении за одно и то же время равны между собой, после чего, с увеличением коэффициента форсировки потери энергии при форсированном возбуждении превышают потери энергии при постоянном возбуждении за одно и то же время. Из рисунков 2, а и б видно, что с увеличением коэффициента форсировки увеличение энергии потерь идет тем быстрее, чем больше отношение  $\frac{T_3}{T_2}$ .

По аналогии для отношения энергии потерь в обмотке возбуждения при прерывистом и постоянном возбуждении можно написать

$$k_{6ф} = \frac{Q_{2к}}{\frac{U_2^2}{r_2} t} = k^2 + \frac{B(n-1)[2к + B(0,5n - k \pm 0,5)]}{\ln \frac{k-n}{k-1}} \quad (24)$$

Результаты расчета по (24) представлены на рис. 3, а и б для  $n=0$  и  $n=0,5$  для различных соотношений между обмоткой возбуждения и демпферной обмоткой. Из рисунков видно, что характер зависимостей такой же, как и на рис. 2, а и б.

Из анализа рисунков видно, что допустимые коэффициенты форсировки можно выбрать из двух условий:

а) из условия допустимых суммарных потерь в обмотках ротора, для чего уравнение (23) надо приравнять единице, то есть, чтобы потери в обмотках ротора при постоянном и прерывистом возбуждении за одно и то же время были одинаковы:

$$k^2 + \frac{B(n-1)(k + 0,5n + 0,5)}{\ln \frac{k-n}{k-1}} = 1 \quad (25)$$

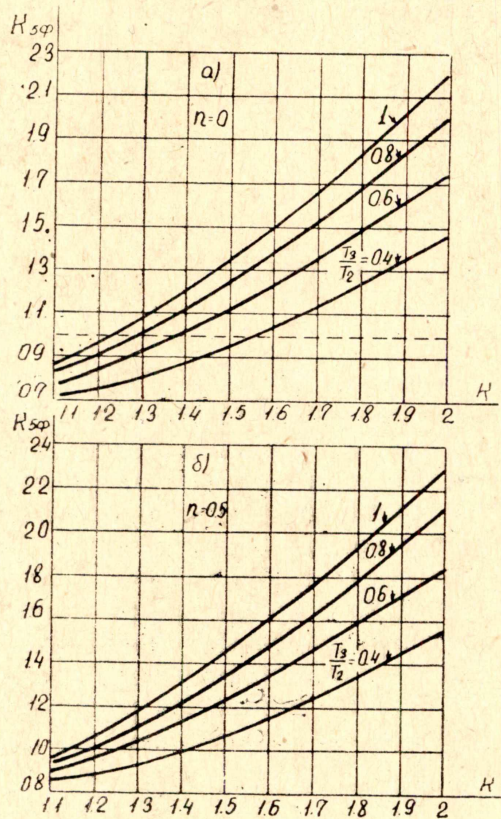


Рис. 2. Зависимость отношения потерь в обмотках ротора при форсированном возбуждении и постоянном возбуждении за одно и то же время от коэффициента форсировки для  $n=0$  и  $n=0,5$

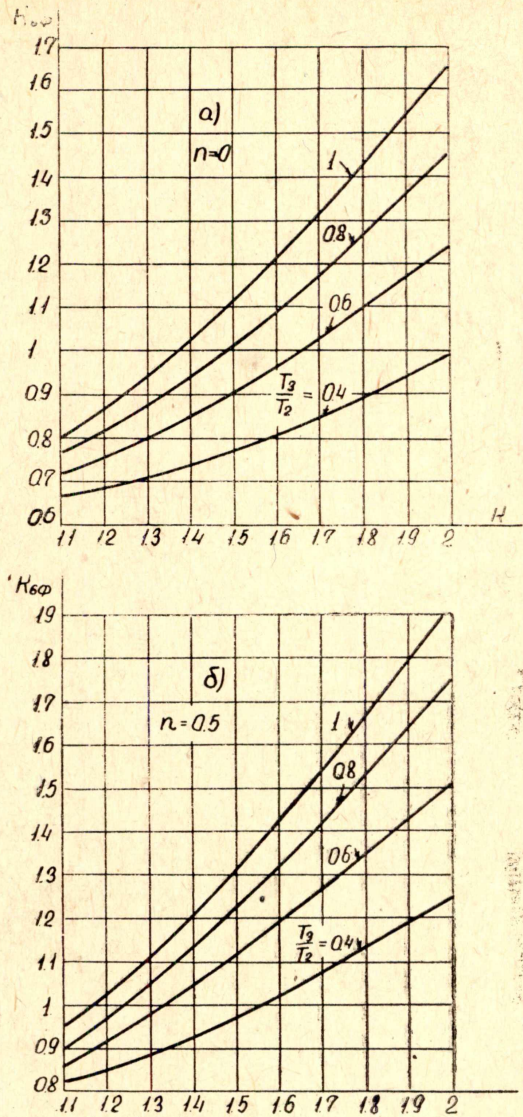


Рис. 3. Зависимость отношений потерь в обмотке возбуждения при форсированном и постоянном возбуждении за одно и то же время от коэффициента форсировки для  $n=0$  и  $n=0,5$

Или после упрощений:

$$(k^2 - 1) \ln \frac{k - n}{k - 1} + B(n - 1)(k + 0,5n + 0,5) = 0. \quad (26)$$

Для заданных  $B$  и  $n$  это трансцендентное уравнение может быть решено приближенно с любой степенью точности относительно  $k$ . Решение уравнения представлено на рис. 4, а для  $n=0$  и  $n=0,5$ ;

б) из условия допустимых потерь в обмотке возбуждения, для чего уравнение (24) необходимо приравнять единице, то есть чтобы потери в обмотке возбуждения при постоянном и прерывистом возбуждении за одно и то же время были одинаковы:

$$k^2 + \frac{B(n - 1)[2k + B(0,5n + 0,5 - k)]}{\ln \frac{k - n}{k - 1}} = 1. \quad (27)$$

Или после упрощений:

$$(k^2 - 1) \ln \frac{k - n}{k - 1} + B(n - 1)[2k + B(0,5n - k + 0,5)] = 0. \quad (28)$$

Решение последнего уравнения представлено на рис. 4, б.

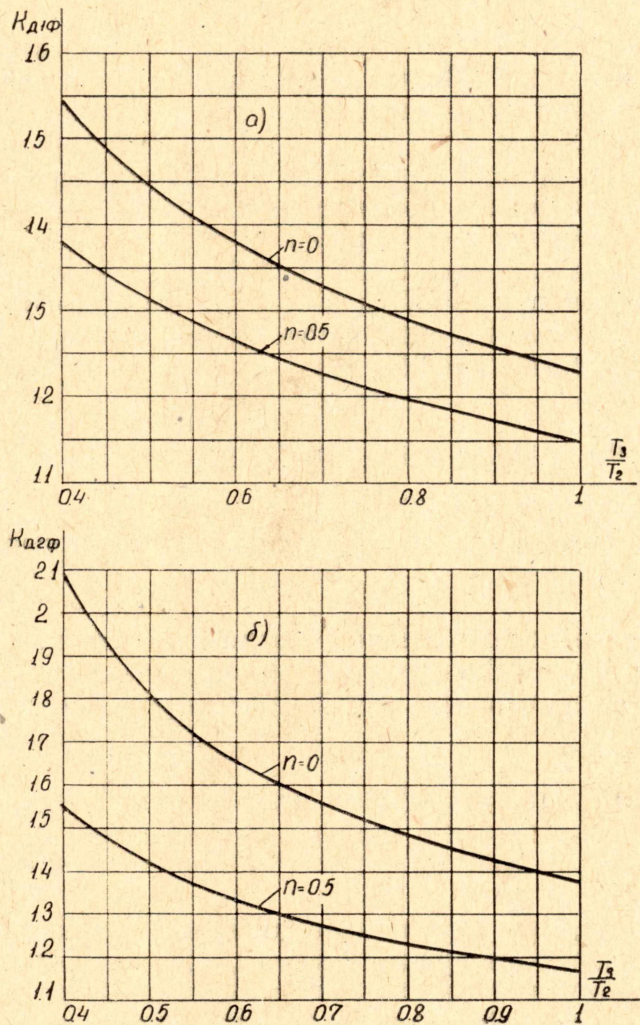


Рис. 4. К расчету допустимых коэффициентов форсировки

Необходимо произвести сравнение суммарных потерь энергии в расчете на один импульс тока статора при работе с допустимым коэффициентом форсировки, выбранных из первого и второго условий. При сравнении принимаем отношение постоянных времени  $\frac{T_3}{T_2} = 0,8$ , тогда при работе при допустимом коэффициенте, выбранном из условия равенства суммарных потерь в обмотках ротора  $k_{диф} = 1,28$  (рис. 4, а) при постоянном и прерывистом возбуждении, потери энергии в стали машины сокращаются в 2,17 раза по сравнению с постоянным возбуждением за то же самое время. Электромагнитные потери в ударном генераторе ТИ-100-2 распределяются при холостом ходе следующим образом:

- Потери в стали статора — 346,2 квт.
- Потери в стали ротора — 281 квт,
- Общие потери в стали — 627,2 квт.
- Потери на возбуждение — 120 квт.

Отношение суммарных потерь энергии холостого хода при постоянном и форсированном возбуждении за одно и то же время равно:

$$\frac{289t + 120t}{627,2t + 120t} = 0,55, \quad (29)$$

то есть потери энергии при нарастании потока до одного и того же значения сокращаются в 1,8 раза по сравнению с тем случаем, если возбуждение оставлять постоянным, при этом длительность форсировки будет равна  $t = 1,52T$  сек. При  $p = 0,5$  отношение потерь составляет 0,72, то есть потери энергии при нарастании потока до одного и того же значения при форсированном возбуждении сокращаются в 1,38 раза по сравнению с постоянным возбуждением за одно и то же время, при этом длительность цикла составит 1,25T сек. Если сравнить энергию потерь, которая выделяется при  $p = 0,5$  и  $p = 0$ , то это отношение равно 0,926, то есть примерно равно единице, однако, при  $p = 0,5$  время на форсировку сокращается примерно в 1,2 раза.

При выборе допустимого коэффициента форсировки  $k_{д2ф}$  из условия равенства энергии потерь в обмотке возбуждения для  $\frac{T_3}{T_2} = 0,8$  и  $p = 0$  из рис. 4, б находим  $k_{д2ф} = 1,49$ .

Отношение суммарных потерь энергии при форсированном и постоянном возбуждении для  $k_{д2ф} = 1,49$  равно 0,55 при длительности форсировки  $t = 1,1T$ .

Если найти отношение потерь энергии при форсированном возбуждении с  $k_{д2ф} = 1,28$  и при форсированном возбуждении с  $k_{д2ф} = 1,49$ , то оно равняется 1,55, то есть потери энергии при форсированном возбуждении с  $k_{д2ф} = 1,49$  в 1,55 раза меньше, чем при форсированном возбуждении с  $k_{д2ф} = 1,28$ .

При  $p = 0$  допустимый коэффициент форсировки  $k_{д2ф} = 1,24$ . Сравним отношение суммарных потерь энергии при  $k_{д2ф} = 1,49$  и  $p = 0$  с потерями энергии при  $k_{д2ф} = 1,24$  и  $p = 0,5$ . Это отношение равно 0,97, т. е. примерно равно единице.

Следовательно, при выборе допустимого коэффициента из второго условия варианты работы при  $p = 0$  и  $p = 0,5$  равнозначны.

Проверка расчетных результатов проводилась на экспериментальной установке, состоящей из специально спроектированного генератора, возбuditеля и нагрузки. Описание установки дано в [4].

Осциллографировалось нарастание тока в обмотке возбуждения при включении ее на напряжение 6,7; 13,4 и 20,1 в и нарастание напряжений. При включении обмотки возбуждения на напряжение 6,7 в напряжении на зажимах генератора до 84в при подаче на обмотку возбуждения каждого из напряжений. При включении обмотки возбуждения на напряжение 6,7 в напряжение на зажимах обмотки статора 84в достигало в установившемся режиме. По осциллограммам напряжения на зажимах обмотки статора в функции времени сравнивались площади полученных кривых с площадями, которые получались бы при постоянном токе возбуждения 55а и постоянном напряжении 84в, если бы они действовали такое же время, как и при форсированном возбуждении при нарастании напряжения до 84в.

Результаты обработки осциллограмм представлены в табл. 1.

При конечном напряжении 84в магнитная система не насыщена, так как номинальное напряжение генератора 287в.

Таким образом, допустимый коэффициент форсировки необходимо выбирать из условия равенства энергии потерь холостого хода при форсированном возбуждении и при постоянном возбуждении за одно и то же



время. Опытная проверка показала удовлетворительное совпадение расчетных и опытных данных.

Таблица I

№ п.п.	Напряжение на обмотке возбуждения (в)	Выходное напряжение генератора (в)	$k_{4\phi}$		$k_{6\phi}$		Примечание
			опыт	расчет	опыт	расчет	
1	6,7	84	0,59	0,53	0,73	0,72	$\frac{T_3}{T_2} = 1$
2	13,4	84	0,40	0,39	1,69	1,66	$T = T_3 + T_2 =$ $= 1,6 \text{ сек}$
3	20,1	84	0,38	0,37	3,66	3,15	

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Enseie Arnold, Slamecka Ernst. Новая испытательная лаборатория разрывных мощностей фирмы Siemens—Schuckrtwerke. Экспресс-информация. Электрические машины и аппараты, 17, 1962.
2. А. И. Воронцов, Г. М. Хуторецкий. Генератор разрывной мощности на 2500 Мва. Сб. «Электросила», 20, 1960.
3. О. Б. Брон. Автоматы гашения магнитного поля, Госэнергоиздат, 1961.
4. Г. А. Сипайлов, А. И. Верхотуров, К. А. Хорьков, А. В. Лоос. Модель генератора ударной мощности, Известия ТПИ, т. 160, 1966.