

К ВОПРОСУ О ЗАЩИТЕ ГЕНЕРАТОРОВ ОТ СВЕРХТОКОВ

И. Д. КУТЯВИН и Н. В. ЛИСЕЦКИЙ

В настоящее время для защиты генераторов от сверхтоков применяется защита максимального тока с пуском минимального напряжения. На эту защиту возлагаются следующие функции:

1. Защита сборных шин станции (если же шины имеют специальную защиту, то рассматриваемая защита служит резервом к ней).

2. Резервирование основной защиты генераторов от междуфазных повреждений.

3. Резервирование защиты фидеров, отходящих от шин станции.

Первичный ток трогания рассматриваемой защиты обычно устанавливается в пределах (1,3 — 1,5) номинального тока генератора, а напряжение трогания в пределах (0,7 — 0,75) номинального. При таких уставках защита способна достаточно надёжно выполнять только первые две из указанных функций, а третью функцию она будет выполнять на станциях с реактированными фидерами только в том случае, когда остаточное напряжение на шинах будет равно или меньше напряжения трогания защиты.

Указанное соотношение между остаточным напряжением на шинах и напряжением трогания защиты соблюдается только при коротких замыканиях на реактированных фидерах средней и большой мощности. При коротких замыканиях за реакторами маломощных фидеров остаточное напряжение на шинах может значительно превышать напряжение трогания рассматриваемой защиты, и если при этом фидерная защита отказывает в работе, то ликвидация аварии может быть произведена только вручную обслуживающим персоналом. Такое длительное протекание аварийных токов может вызвать большие разрушения в фидерной ячейке.

Учитывая изложенное, интересно было бы найти условия надёжной работы указанной защиты, как резервной к фидерной защите. Для этого необходимо исследовать зависимость остаточного напряжения на шинах и тока повреждения, протекающего в обмотках генератора, от степени реактирования фидеров и предшествовавшей короткому замыканию нагрузки генератора. При этом под степенью реактирования фидеров понимается отношение реактанса реактора фидера X_p к реактансу системы X_c :

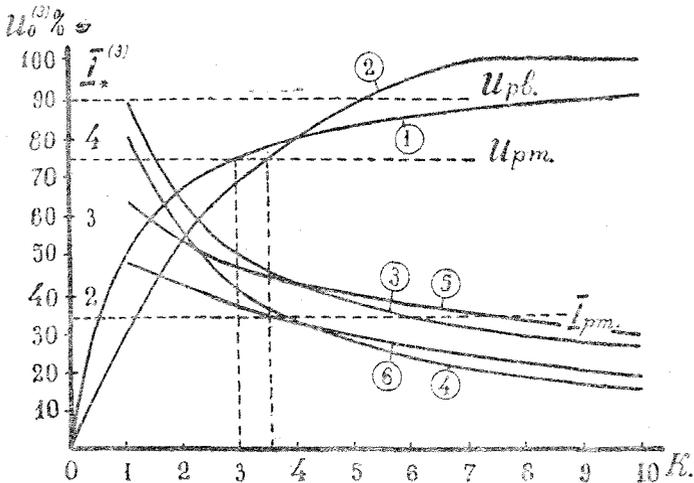
$$K = \frac{X_p}{X_c}. \quad (1)$$

Рассмотрим сначала зависимость остаточного напряжения на шинах в начальный момент трёхполюсного короткого замыкания за фидерным реактором от различной степени реактирования K . Для этого случая величину остаточного напряжения в процентах от номинального можно выразить через реактансы следующим образом:

$$U_0^{(3)} = \frac{X_p}{X_c + X_p} \cdot 100 = \frac{\frac{X_p}{X_c}}{1 + \frac{X_p}{X_c}} \cdot 100 = \frac{100K}{1+K}. \quad (2)$$

Построенная по выражению (2) кривая $U_0^{(3)} = f(K)$ при $t = 0$ показана на фиг. 1 (кривая 1).

Однако для выяснения полной картины изменения остаточного напряжения при рассматриваемом режиме желательно знать также зависимость остаточного напряжения при установившемся процессе короткого замыкания $U_0^{(3)} = f(K)$. Последнюю можно вычислить, определив предвари-



Фиг. 1

тельно по расчётному реактансу $X = X_c(1 + K)$, относительную величину установившегося тока трёхполюсного короткого замыкания $I_*^{(3)}$, тогда

$$U_{0y}^{(3)} = I_*^{(3)} x_p 100 = K x_c I_*^{(3)} 100. \quad (3)$$

Кривая (2) фиг. 1 даёт зависимость $U_{0y}^{(3)} = f(K)$ при $x_c = 0,125$, т. е. при минимально возможном его значении, что должно дать наибольшую величину $U_{0y}^{(3)}$.

Сравним теперь полученные значения остаточных напряжений с напряжениями трогания и возврата реле вольтметровой блокировки. Напряжение трогания определяется по известной формуле

$$U_{рм} = \frac{K_n U_{раб. \min}}{k_n n_n}. \quad (4)$$

Минимальное рабочее напряжение установки $U_{раб. \min}$ рекомендуется принимать равным 95% от номинального напряжения ($U_{ном}$) и коэффициент надёжности $K_n = 0,95$, тогда

$$U_{рм} = \frac{0,9 U_{ном}}{k_n n_n}. \quad (5)$$

При использовании реле ЭН, коэффициент возврата которых $K_v = 1,2$, получим

$$U_{рм} = 0,75 \frac{U_{ном}}{n_n},$$

что составляет 75% первичного напряжения. Напряжение возврата $U_{рв}$ при этих условиях будет равно 90% от номинального напряжения.

Напряжения $U_{рм}$ и $U_{рв}$ нанесены на фиг. 1. Как видно из этой фигуры, вольтметровая блокировка будет работать в начальный момент трёх-

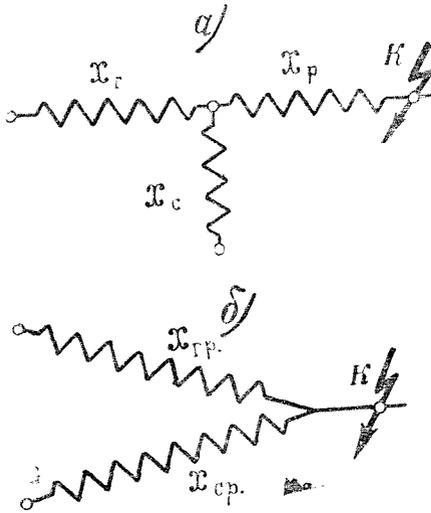
фазного короткого замыкания только при $K \leq 3$, при $3 < K < 3,5$, блокировка будет работать по мере затухания тока короткого замыкания и при $K > 3,5$ совсем не будет работать.

На основании указанных кривых можно сделать ещё вывод о том, что при замыканиях за реакторами с большими степенями реактирования вольтметровая часть защиты может блокировать токовую, если уставки их не будут согласованы.

Для согласования уставок необходимо выяснить величину токов повреждения, протекающих в обмотках генератора при коротком замыкании за фидерным реактором при различной степени реактирования K . Для этого определим ток короткого замыкания, посылаемый генератором с учётом индивидуального затухания.

Предположим, что схема замещения цепи короткого замыкания характеризуется фиг. 2а, где x_2 — реактанс генератора, x_c — реактанс системы и x_p — реактанс реактора.

Реактанс луча генератора согласно схеме замещения (фиг. 2б) будет:



Фиг. 2

$$x_{cp} = x_2 + \frac{x_p}{c} = x_2 + \frac{x_p}{\frac{x_c}{x_c + x_2}} = x_2(1 + K). \quad (6)$$

Тогда ток трёхполюсного короткого замыкания, протекающий в цепи генератора при $t=0$, в относительных единицах выразится:

$$I_{t=0}^{(3)} = \frac{1}{x_{cp}} = \frac{1}{x_2(1 + K)}. \quad (7)$$

Одновременно с этим генератор сохранит некоторую нагрузку, величина которой будет зависеть от остаточного напряжения на секции данного генератора и от нагрузки, шунтированной коротким замыканием.

Предположим, что перед коротким замыканием генератор работал на холостом ходу, тогда при коротком замыкании ток в обмотках генератора будет целиком определяться выражением (7).

Допустим далее, что перед коротким замыканием генератор имел нагрузку

$$I_{н2} = I'_{н2} + jI''_{н2} \quad (8)$$

и что короткое замыкание за фидерным реактором шунтирует часть этой нагрузки генератора так, что остаточная нагрузка его может быть учтена коэффициентом α ($\alpha < 1$).

Предположим, что посадка напряжения на шинах вызывает пропорциональное снижение реактивной составляющей тока нагрузки $I''_{н2}$ и обратно пропорциональное увеличение активной — $I'_{н2}$. Тогда эффективное значение периодической составляющей тока генератора в относительных единицах для начального момента короткого замыкания за фидерным реактором в комплексной форме будет:

$$I_2 = \frac{\alpha}{U_0^{(3)}} I'_{н2} + j \left[\alpha U_0^{(3)} I''_{н2} + \frac{1}{x_2(1 + K)} \right] \quad (9)$$

и действующее значение этого тока

$$I_2 = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{U_0^{(3)}} I_{H2}\right)^2 + \left[\alpha U_0^{(3)} I_{H2}'' + \frac{1}{x_c(1+K)}\right]^2}. \quad (10)$$

Величину установившегося тока в обмотках генератора можно определить следующим образом: по расчётному реактансу луча генератора (см. выражение 6) для заданной степени реактирования „ K “ находим установившийся ток и подставляем его в (9) и (10) вместо начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания, а $U_0^{(3)}$ заменяем на $U_{0y}^{(3)}$. Тогда ток генератора при установившемся режиме короткого замыкания будет

$$I_{2y}^{(3)} = \frac{\alpha}{U_{0y}^{(3)}} I_{H2} + j \left(\alpha U_{0y}^{(3)} I_{H2}'' + I_{\Sigma y}^{(3)} \right). \quad (11)$$

Действующее значение этого тока

$$I_{2y}^{(3)} = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{U_{0y}^{(3)}} I_{H2}\right)^2 + \left(\alpha U_{0y}^{(3)} I_{H2}'' + I_{\Sigma y}^{(3)}\right)^2}. \quad (12)$$

На фиг. 1 показаны кривые изменения тока в обмотках генератора в зависимости от „ K “ при $t=0$ и $t=\infty$ для случаев, когда генератор перед коротким замыканием работал на холостом ходу и с номинальной нагрузкой. Степень шунтирования α принята 0,7. Кривая (3) даёт зависимость $I_2 = f(K)$ при $t=0$ и при $I_{H2} = 0,8 + j0,6$, кривая (4) при $t=0$ и $I_{H2} = 0$. Кривая (5) построена для $I_{2y} = f(K)$ при $I_{H2} = 0,8 + j0,6$ и $t = \infty$ и кривая (6) при $I_{H2} = 0$ и $t = \infty$.

Как видно из фиг. 1, при кратности реактирования $K \ll 3,5$ первичный ток трогания максимальных токовых реле можно увеличить до 1,7 номинального тока генератора. Уставка тока меньше 1,7 номинального тока генератора нецелесообразна, так как при меньших уставках и замыканиях за реактором с большей кратностью реактирования, чем 3,5, вольтметровая блокировка всё равно не даст сработать защите. При замыканиях же за меньшими реактансами ток повреждения всегда будет большим, чем 1,7 номинального тока генератора.

Аналогичные расчёты можно произвести и для двухполюсного короткого замыкания. В этом случае остаточное напряжение между повреждёнными фазами $U_0^{(2)}$ при $t=0$, выраженное в процентах от номинального, вычисляется также по выражению (2). Величина его определяется кривой (1) фиг. 3.

Остаточное напряжение на секции между повреждёнными фазами $U_{0y}^{(2)}$ при $t = \infty$ можно вычислить следующим образом: по расчётному реактансу $x_{расч} = 2x_c(1+K)$ и по кривым затухания определяется относительный установившийся ток прямой последовательности $I_{\Sigma y1}$, тогда остаточное напряжение в процентах от номинального вычисляется из следующего выражения:

$$U_{0y}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} I_{\Sigma y1} 2x_p 100}{\sqrt{3}} = 2K x_c I_{\Sigma y1} 100. \quad (13)$$

Кривая остаточного напряжения между повреждёнными фазами при $t = \infty$, построенная по выражению (13) для $x_c = 0,125$, показана на фиг. 3 (кривая 2). На этой же фигуре нанесены напряжения трогания и возврата вольтметровой блокировки, соответственно равные 75 и 90% номинального напряжения.

Из указанной фигуры видно, что вольтметровая блокировка будет надёжно работать при $K \ll 3$.

Для подсчёта токов при двухполюсном коротком замыкании предположим, что до возникновения короткого замыкания генератор имел нагрузку, определяемую выражением (8), и что зависимость этой нагрузки от степени шунтировки α и остаточного напряжения на шинах U_0 будет та же, что и при трёхполюсном коротком замыкании. При этом ток в неповреждённой фазе будет равен току нагрузки, а в повреждённых фазах он будет определяться следующими выражениями:

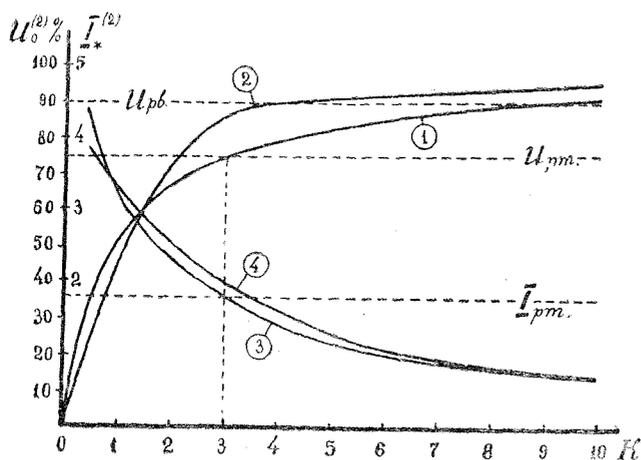
а) для опережающей фазы

$$I_{on} = \left(\frac{I'_{н2} \alpha}{U_0} + I_k \cos 60^\circ \right) + j \left(\alpha U_0 I''_{н2} + I_k \sin 60^\circ \right), \quad (14)$$

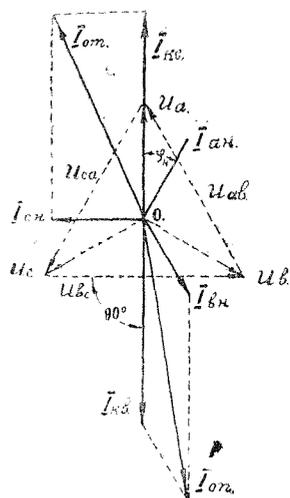
б) для отстающей фазы

$$I_{om} = \left(\frac{I'_{н2} \alpha}{U_0} - I_k \cos 60^\circ \right) - j \left(\alpha U_0 I''_{н2} + I_k \sin 60^\circ \right), \quad (15)$$

где U_0 — остаточное напряжение прямой последовательности,
 I_k — ток двухполюсного короткого замыкания.



Фиг. 3



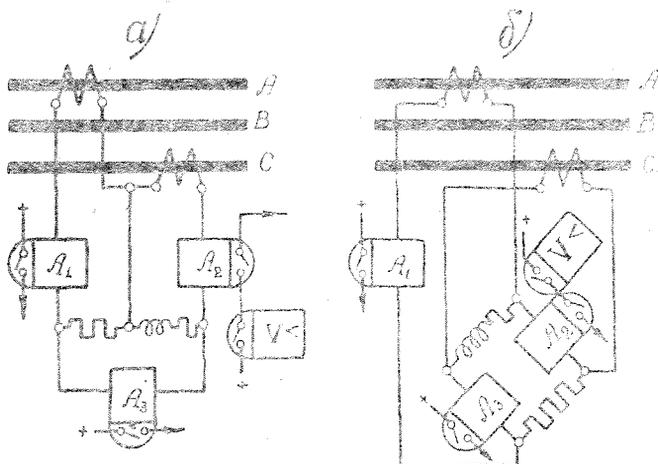
Фиг. 4

Выражения (14) и (15) написаны на основании векторной диаграммы токов, построенной для двухполюсного короткого замыкания между фазами B и C . Упомянутая векторная диаграмма приведена на фиг. 4, из рассмотрения которой видно, что большим по абсолютной величине всегда будет ток опережающей фазы, причем наименьшее его значение будет в случае отсутствия у генератора нагрузки перед коротким замыканием. Для этого случая и построены кривые зависимости тока опережающей фазы от степени реактирования K , приведённые на фиг. 3. Кривая (3) даёт зависимость $I_{on} = f(k)$ при $t = 0$ и $I_{н2} = 0$, а кривая (4) — зависимость $I_{om} = f(k)$ при $t = \infty$ и $I_{н2} = 0$.

Как видно из фиг. 3, при кратности реактирования $K \leq 3$ первичный ток трогания максимальных токовых реле можно увеличить без ущерба чувствительности защиты при двухполюсном коротком замыкании до 1,8 номинального тока генератора. Однако, исходя из чувствительности защиты при трёхполюсном коротком замыкании, уставку тока максимальных токовых реле следует увеличивать только до 1,7 номинального тока генератора.

На основании кривых фиг. 1 и 3 можно сделать также вывод о том что при малых степенях реактирования ($K \leq 3$) вольтметровая блокировка с первичной уставкой $U_{рм} = 0,75 U_{ном}$ будет работать достаточно надежно при всех видах короткого замыкания. Это условие трудно выполнить для маломощных фидеров, если применять на них реакторы с номинальными реактансами от 2 до 6%. Следовало бы поставить вопрос об изготовлении реакторов на токи 100—400 ампер с малыми реактансами 0,5—1%, что удешевило бы эти реакторы и, с другой стороны, позволило бы сделать максимальную токовую защиту с вольтметровой блокировкой более надежной. Другим выходом из этого положения является объединение маломощных фидеров под один выключатель, т. е. создание групповых фидеров.

Весьма большой интерес представляет другое решение вопроса защиты генераторов от сверхтоков — применение малорелейных схем с повышенной чувствительностью и селективностью. На фиг. 5 приведены два варианта подобных схем. Схема фиг. 5а предложена кандидатом технических наук И. А. Сыромятниковым ¹⁾. В этой схеме реле 1 предназ-



Фиг. 5

начено для защиты генератора от перегрузки рабочим током и действует на сигнал с выдержкой времени 8—10 сек. Реле 2 имеет вольтметровую блокировку и защищает генератор от трёхфазных коротких замыканий с выдержкой времени 6—10 сек. Наконец, реле 3 включается в схему через фильтр токов отрицательной последовательности и действует с такой же выдержкой времени, что и реле 2.

Схема фиг. 5б отличается от предыдущей тем, что реле 2 и 3 включаются через комбинированный фильтр токов положительной и отрицательной последовательностей.

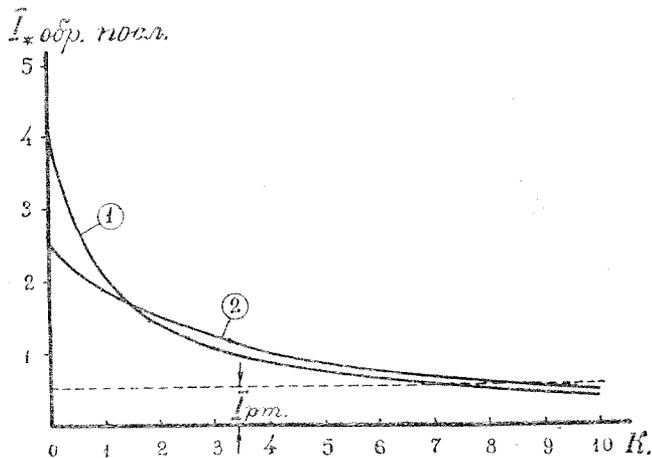
Чувствительность защиты, выполненной при помощи реле 2, была подробно рассмотрена выше, поэтому здесь на ней не останавливаемся.

Чувствительность защиты максимального тока обратной последовательности характеризуется фиг. 6, на которой приведены зависимости токов обратной последовательности при двухполюсном коротком замыкании при $t=0$ (кривая 1) и при $t=\infty$ (кривая 2). Как видно из этой фигуры, защита максимального тока обратной последовательности с первичным током трогания 0,5 номинального тока генератора будет работать при кратностях реактирования $K \leq 7$. Следовательно, рассматриваемая малорелейная схема защиты расширяет предел чувствительности при двухполюс-

¹⁾ См. «Электрические станции» № 3 за 1948 г., стр. 42.
5. Изв. ТПИ, т. 72

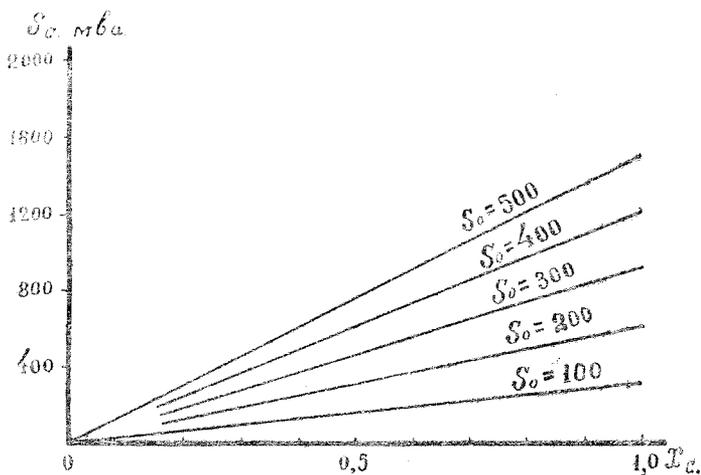
ном коротком замыкании с $K=3$ до $K=7$, а при трёхфазном коротком замыкании сохраняется предел $K \leq 3,5$.

Если произвести укрупнение фидеров за счёт их группировки таким образом, чтобы кратность реактирования не выходила за пределы 3,5 или добиться этих пределов реактирования путём применения на маломощных фидерах реакторов с реактансами $0,5 \div 1\%$, то при $U_{рм} = 0,75 U_{ном}$ малорелейная схема обеспечит работу защиты во всех случаях.



Фиг. 6

Если придерживаться указанной точки зрения, то при выборе фидерных реакторов необходимо соблюдать условие, чтобы $K \leq 3,5$. Но тогда может возникнуть сомнение в эффективности применения фидерных реакторов с точки зрения ограничения отключаемой мощности. На сколько



Фиг. 7

эффективно применение реакторов при $K=3,5$, видно из фиг. 7, где построена зависимость предельной мощности системы S_c от отключаемой мощности выключателя S_0 и реактанса системы x_c , $S_c = f(S_0, x_c)$. При построении характеристик фиг. 7 по оси абсцисс откладывался реактанс системы в относительных единицах, а по оси ординат допустимая мощность системы в мгва. В этих осях координат построено семейство прямых для

различных мощностей отключения S_o . Уравнение, на основании которого построены указанные прямые, получено следующим образом.

Действующее значение периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания при $t=0$ в относительных единицах может быть выражено:

$$I_*^{(3)} = \frac{1}{x_c + x_p} = \frac{1}{x_c(1+K)},$$

тогда отключаемая мощность установки (S_{oy}) в относительных единицах при $t=0$ и трёхфазном коротком замыкании будет иметь следующее выражение:

$$S_{oy} = \frac{S_c}{x_c(1+K)}.$$

Отключаемая мощность выключателя реактированного фидера может быть записана:

$$S_o = \frac{k_3 S_c}{x_c(1+K)},$$

где k_3 — коэффициент запаса, рекомендуемый „Руководящими указаниями по расчёту токов короткого замыкания“, принимать в пределах 1,5 ÷ 2.

Отсюда допустимая мощность системы:

$$S_c = S_o x_c \frac{1+K}{k_3}. \quad (16)$$

Характеристики, приведённые на фиг. 7, построены на основании уравнения (16). При построении было принято $K=3,5$ и $k_3=1,5$.

Из фиг. 7 видно, что при использовании выключателя типа ВМГ—133 в сетях 10,5 кВ и при $K=3,5$ и $x_c=1$ мощность системы может быть доведена до 1000 мва. Применение выключателей типа МГГ—10 увеличивает допустимую мощность системы (при $x_c=1$) до 1500 мва.

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Для увеличения чувствительности защиты генератора от сверхтоков следовало бы применять малорелейные схемы с фильтрами токов отрицательной последовательности. Это расширило бы пределы чувствительности защиты при двухфазном коротком замыкании до $K=7$ и при трёхфазном коротком замыкании до $K=3,5$.

2. При проектировании защиты следует производить тщательный анализ её чувствительности и, в случае необходимости, добиваться снижения „ K “ до предельно-допустимой величины за счёт применения групповых фидеров, установки на маломощных фидерах реакторов с большими номинальными токами и другими средствами.