

**К РАСЧЕТУ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ БЛОЧНОГО  
ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО С ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ  
ЧЕРЕЗ ДУГОГАСЯЩУЮ КАТУШКУ**

П. Т. АНОХИН, Р. А. ВАЙНШТЕЙН

(Представлена научным семинаром кафедры электрических станций)

Для защиты от замыканий на землю обмоток статора блочного генератора применяется защита напряжения нулевой последовательности. Методика расчета [1, 2] предусматривает отстройку от действующего значения напряжения тройной частоты  $U_{03}$ , обусловленного искажением синусоидальной формы кривой фазного напряжения генератора, и напряжения основной частоты  $U_{0\text{эл.ст}}$ , обусловленного электростатической индукцией между обмотками трансформатора блока при замыкании на стороне высшего напряжения. В качестве уставки обычно принимается минимальное напряжение срабатывания реле  $U_{\text{ср}} = 15 \text{ в}$ . Чтобы исключить отстройку от напряжения  $U_{0\text{эл.ст}}$ , предусматривается выдержка времени, превышающая время действия токовой защиты нулевой последовательности трансформатора блока.

Гидрогенераторы средней и большой мощности, как правило, имеют емкостные токи замыкания на землю  $I_c$  более 5 а, поэтому для их компенсации используются дугогасящие катушки, включаемые в нейтрали генераторов. Рекомендуются работа катушек с резонансной настройкой или с небольшой расстройкой [2].

Компенсация емкостного тока преследовала цель сохранить генератор в работе при наличии однофазного замыкания на землю в цепи генератора и тем самым повысить надежность электроснабжения. В этом случае защита должна действовать на сигнал, и выдержка времени порядка нескольких секунд принципиального значения не имеет.

На некоторых ГЭС, где замыкание обмотки статора на землю считается опасным, защита действует на отключение генератора с небольшой выдержкой времени. Одновременно вводится блокировка от токовой защиты нулевой последовательности трансформатора блока. Это коренным образом меняет режим работы согласно назначению дугогасящих катушек, в результате чего возникает вопрос о целесообразности их применения.

В настоящей статье даются некоторые обобщения при расчете напряжения смещения нейтрали генератора  $U_{0\text{эл.ст}}$  с учетом переходного режима. Рассматривается влияние расстройки и потерь на эффективность работы дугогасящей катушки. При определении выдержки времени защиты, действующей на отключение генератора, кроме условия селективности учитывается возможность использования дугогасящих свойств катушки при неустойчивых замыканиях на землю.

## Определение напряжения $U_{0 \text{ эл.ст}}$

Схема замещения приведена на рис. 1, где

$U_0^{(в)}$  — напряжение нулевой последовательности при замыкании на стороне высшего напряжения блока;

$K$  — коэффициент, учитывающий распределение напряжений  $U_0^{(в)}$  по обмотке высшего напряжения трансформатора (при изолированной нейтрали  $K = 1,0$ , а при заземленной нейтрали  $K = 0,5$ ) [2];

$C_{т.мо}$  — емкость между обмотками высшего и низшего напряжения одной фазы трансформатора блока;

$C_r$  и  $C_g$  — емкость одной фазы генератора и трансформатора по отношению к земле;

$R_y$  — активное сопротивление утечки одной фазы генератора относительно земли;

$L_k$  — индуктивность дугогасящей катушки;

$R_k$  — активное сопротивление с учетом потерь в меди и в стальном сердечнике катушки.

Расчетная схема составлена в предположении, что защита подключена ко вторичной обмотке дугогасящей катушки. Кроме того, при составлении схемы замещения нулевой последовательности приняты перечисленные ниже допущения.

1. Трехфазную систему считаем симметричной.

2. Индуктивность дугогасящей катушки  $L_k$  линейна.

3. Емкости  $C_r$  опускаем, полагая  $C_r \ll C_g$ .

4. Активные потери, обусловленные эквивалентным сопротивлением утечки  $R_{yэ} = \frac{R_y}{3}$ , не учитываем. Для гене-

раторов с газовым охлаждением они пренебрежимо малы, а для генераторов с непосредственным охлаждением обмотки статора водой их в необходимых случаях можно учесть дополнительно.

5. Сопротивление нулевой последовательности генератора по сравнению с сопротивлением дугогасящей катушки очень мало.

Введем сокращенные обозначения:

$K_1 = \frac{1}{3\omega^2 L_k C_r}$  — степень настройки колебательного контура  $R_k, L_k, 3C_r$ ;

$V_1 = 1 - K_1$  — степень расстройки того же контура,

$d_k = \frac{R_k}{\omega L_k}$  — коэффициент, характеризующий потери в дугогасящей катушке (коэффициент успокоения катушки).

Принимая во внимание, что  $d_k^2 \ll 1$  и  $C_{т.мо} \ll C_r$ , напряжение  $U_{0 \text{ эл.ст}}$  в установившемся режиме можно представить в виде

$$U_{0 \text{ эл.ст}} = \frac{C_{т.мо}}{C_r} \cdot \frac{K \cdot U_0^{(в)}}{\sqrt{d_k^2 + V_1^2}} \quad (1)$$

Для сетей, работающих с глухозаземленными нейтралью, величина  $U_0^{(в)}$  определяется выражением

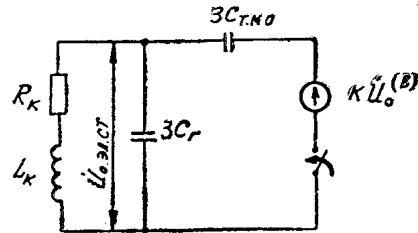


Рис. 1. Схема замещения для определения напряжения  $U_{0 \text{ эл.ст}}$ , обусловленного электростатической индукцией между обмотками трансформатора при замыкании на землю на стороне высшего напряжения

$$U_0^{(B)} = K_0 \cdot U_{\Phi}^{(B)}, \quad (2)$$

где

$$K_0 = \frac{Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0}, \quad (3)$$

$Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_0$  — полные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности относительно места замыкания;

$U_{\Phi}^{(B)}$  — фазное напряжение обмотки высшего напряжения трансформатора блока.

Известно, что при прочих равных условиях наибольшее значение напряжения  $U_0^{(B)}$  на трансформаторе будет при замыкании вблизи шин высшего напряжения. Наш анализ показывает, что при относительном числе трансформаторов, имеющих заземленные нулевые точки, равном  $2/3$  и более, коэффициент  $K_0$  изменяется сравнительно мало и его среднее значение примерно равно  $0,2$ .

Следовательно, для практических расчетов можно принять

$$U_0^{(B)} = 0,2U_{\Phi}^{(B)}. \quad (4)$$

Подставляя в (1) вместо  $U_0^{(B)}$  его значение (4), после некоторых преобразований получим

$$U_{o \text{ эл.ст}} = \frac{K_p}{\sqrt{d_k^2 + V_1^2}} \cdot U_{\Phi}, \quad (5)$$

где

$$K_p = 0,2 \cdot K \cdot K_{ст}, \quad (6)$$

$$K_{ст} = \frac{C_{т.мо}}{C_r} \cdot \frac{U_{\Phi}^{(B)}}{U_{\Phi}}; \quad (7)$$

$U_{\Phi}$  — фазное напряжение генератора.

Порядок величины  $K_{ст}$  определим на примере гидрогенератора типа СВ  $\frac{1160}{170} - 72$ . В табл. 9 [2] приведены его параметры:  $S = 90 \text{ Мва}$ ,

$U_n = 13,8 \text{ кВ}$ ,  $C_r = 0,83 \text{ мкФ/фазу}$ . Трансформатор блока принимаем такой же мощности при  $U_n = 110 \text{ кВ}$ . По кривым рис. 65 [2] находим

$C_{т.мо} = 0,005 \text{ мкФ}$ . Подставляя в (7)  $\frac{U_{\Phi}^{(B)}}{U_{\Phi}} = \frac{121 \cdot \sqrt{3}}{13,8 \cdot \sqrt{3}}$ , а также значения  $C_r$  и  $C_{т.мо}$ , имеем  $K_{ст} = 0,0528$ .

Если предположить, что генератор работает в блоке с трансформатором при  $U_n = 220 \text{ кВ}$ , то получим  $K_{ст} = 0,095$ .

Для блока с другими параметрами коэффициент  $K_{ст}$  будет отклоняться в большую или меньшую стороны. Однако с целью упрощения расчетов остановимся на величине  $K_{ст} = 0,1$ .

Более высокое значение  $U_{o \text{ эл.ст}}$  будет для блока, у которого нейтраль трансформатора изолирована ( $K = 1,0$ ;  $K_p = 0,02$ ).

Графически зависимость (5) показана на рис. 2 в виде кривых 1 и 2, которые построены при  $K_p = 0,02$  и  $d_k = 0,02$  и  $0,03$ . Пересчет на другие значения  $K_p$  производится путем умножения ординат кривых 1 и 2 на отношение  $n_p = \frac{K_p}{0,02}$ . Так, например, при  $K_{ст} = 0,1$  в

случае заземления нейтрали трансформатора блока ( $K = 0,5$ ) имеем  $K_p = 0,01$ , а  $n_p = 0,5$ . В результате получим кривые 3 и 4 (рис. 2).

Таким образом, если нейтраль трансформатора блока не заземлена, то при малых потерях дугогасящей катушки и ее работе с настройкой, близкой к резонансной (кривая 1, рис. 2), напряжение  $U_{o \text{ эл.ст}}$ , хотя

и кратковременно, но может достигать величины  $U_{\phi}$ . В то же время при значениях  $|V_1|$  порядка 0,1 и более величина напряжения  $U_{0 \text{ эл.ст}}$  и его зависимость от степени расстройки и потерь существенно понижается.

При работе дугогасящей катушки с некоторой расстройкой, например, перекомпенсацией ( $V_1 < 0$ ), в переходном режиме возникают

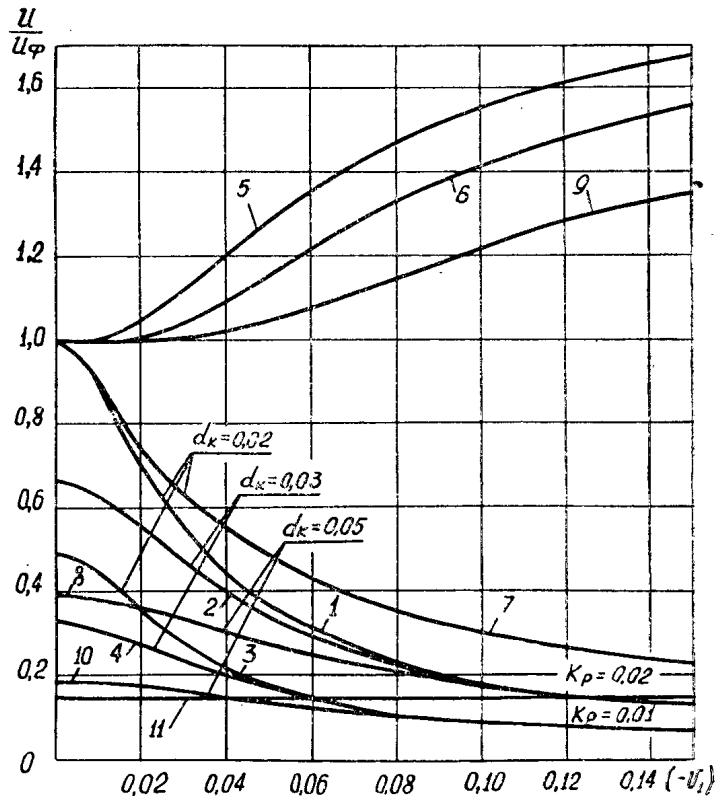


Рис. 2. Кривые, характеризующие зависимость напряжения смещения нейтрали при замыкании на землю на стороне высшего напряжения трансформатора блока

свободные колебания с круговой частотой  $\omega'$ , близкой по величине к промышленной круговой частоте  $\omega$ . Поэтому функция  $U_{0 \text{ эл.ст}}(t)$  имеет характер биений. Период биений  $T_B$  найдем по формуле

$$T_B = \frac{2\pi}{\omega' - \omega} = \frac{0,02}{\sqrt{1 - V_1} - 1}. \quad (8)$$

Максимальное значение огибающей  $U_{0 \text{ эл.ст.м}}$  приближенно можно определить при  $t = \frac{0,01}{\sqrt{1 - V_1} - 1}$  и записать в виде

$$U_{0 \text{ эл.ст.м}}^{(Б)} = \frac{K_p \cdot U_{\phi}}{\sqrt{d_k^2 + V_1^2}} \cdot n_{0 \text{ эл.ст.}}^{(Б)}, \quad (9)$$

где

$$n_{0 \text{ эл.ст.}}^{(Б)} = 1 + \sqrt{1 - V_1} \cdot e^{-\frac{1,57 \cdot d_k}{\sqrt{1 - V_1} - 1}}. \quad (10)$$

Зависимость  $n_{0 \text{ эл.ст.}}^{(Б)}(V_1)$  при  $d_k = 0,02$  и  $0,03$  показана на рис. 2 (кривые 5 и 6). Там же приведена кривая 7, характеризующая зави-

симость  $U_{0 \text{ эл.ст.м}}^{(B)}(V_1)$  при  $K_p = 0,02$  и  $d_k = 0,02$ . Напряжение  $U_{0 \text{ эл.ст.м}}^{(B)}$  при других значениях  $K_p$  определяется так же, как и для установившегося режима.

Следовательно, и в переходном режиме  $U_{0 \text{ эл.ст}}$  с увеличением расстройки катушки понижается.

На рис. 2 приведены также кривые 8, 10 и 9, которые в отличие от кривых 1, 3 и 5 построены при  $d_k = 0,05$ .

Нетрудно заметить, что с повышением мощности трансформатора блока и его номинального напряжения коэффициент  $K_{ст}$  возрастает. Однако при напряжении 500 кВ, когда заземляются нейтрали всех трансформаторов, имеем  $K = 0,5$  и  $K_0 < 0,2$ . Поэтому для мощных генераторов напряжение  $U_{0 \text{ эл.ст}}$  практически заметно не превысит величину  $0,5 U_{ф}$ . В других случаях снижение  $U_{0 \text{ эл.ст}}$  можно обеспечить за счет некоторой расстройки дугогасящей катушки.

Конкретные рекомендации по ограничению напряжения  $U_{0 \text{ эл.ст}}$  путем увеличения расстройки катушки в Руководящих указаниях [2] отсутствуют. В то же время известно, что хотя при наличии расстройки катушка сохраняет дугогасящие свойства [3], но эффективность ее использования снижается. Более того, при значительной расстройке катушки возможны такие же дуговые перенапряжения, как и при изолированной нейтрали [4].

Для блочных генераторов следовало бы иметь рекомендации по регулированию настройки катушки с учетом различных факторов. Так, например, мы считаем, если по каким-либо причинам катушка работает со значительной расстройкой, то при оценке ее эффективности необходимо учитывать фактор активных потерь в колебательном контуре.

### Влияние активных потерь и расстройки дугогасящей катушки на эффективность ее работы

При устойчивом повреждении в цепи генераторного напряжения в месте замыкания на землю будет протекать остаточный ток, обусловленный активными потерями и расстройкой катушки.

При неустойчивом замыкании в момент прохождения результирующего тока в месте замыкания через нуль дуга гаснет. Гашение дуги и развитие перенапряжений при дуговых замыканиях достаточно подробно описаны в работах [3, 4, 5]. В начальный момент после зажигания дуги переходный процесс практически не зависит от наличия катушки [5].

После обрыва дуги переходный процесс условно можно разграничить на две стадии. Сначала происходит выравнивание зарядов между емкостями поврежденной и неповрежденной фаз. Эта стадия протекает так же, как и без дугогасящей катушки, и сопровождается появлением на поврежденной фазе некоторой величины напряжения — пика гашения  $U_{пг}$ . При этом максимальное напряжение смещения нейтрали  $U_{см}$  примерно равно  $1,2 U_{ф}$  [4]. Если немедленного повторного зажигания дуги не происходит, то наступает вторая стадия, когда емкости всех трех фаз начинают разряжаться через индуктивность катушки  $L_k$ . Этот процесс носит характер затухающих колебаний с круговой частотой  $\omega'$ , близкой к  $\omega$ . Напряжение  $U_{пг}$ , как не зависящее от параметров катушки, учитывать не будем, и процесс затухания напряжения  $U_{см}$  запишем в виде

$$U_{см}(t) = U_{мф} e^{-\delta t} \cdot \cos \omega' t, \quad (11)$$

где 
$$\omega' \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_k 3\omega C_r}}.$$

Напряжение на поврежденной фазе нарастает с нулевого значения

$$U_d(t) = U_{m\phi} (\cos \omega t - e^{-\delta t} \cdot \cos \omega' t). \quad (12)$$

Выражение огибающей амплитудных значений функции (12) получим в виде

$$U_d^{(B)}(t) = U_{m\phi} \sqrt{1 - e^{-2\delta t} - 2e^{-\delta t} \cdot \cos(\sqrt{1 - \nu_1 - 1}) \omega t}. \quad (13)$$

На рис. 3 приведены кривые 1 и 2, построенные по выражению (13) при  $d_k=0,02$  и соответственно  $\nu_1=0$  и  $\nu_1=-0,1$ . Там же показана кривая 3, характеризующая зависимость  $U_{cm}(t)$ .

Видно, что при наличии расстройки катушки (кривая 2) скорость нарастания напряжения на поврежденной фазе и его амплитуда значительно выше, чем при резонансной настройке, в результате чего

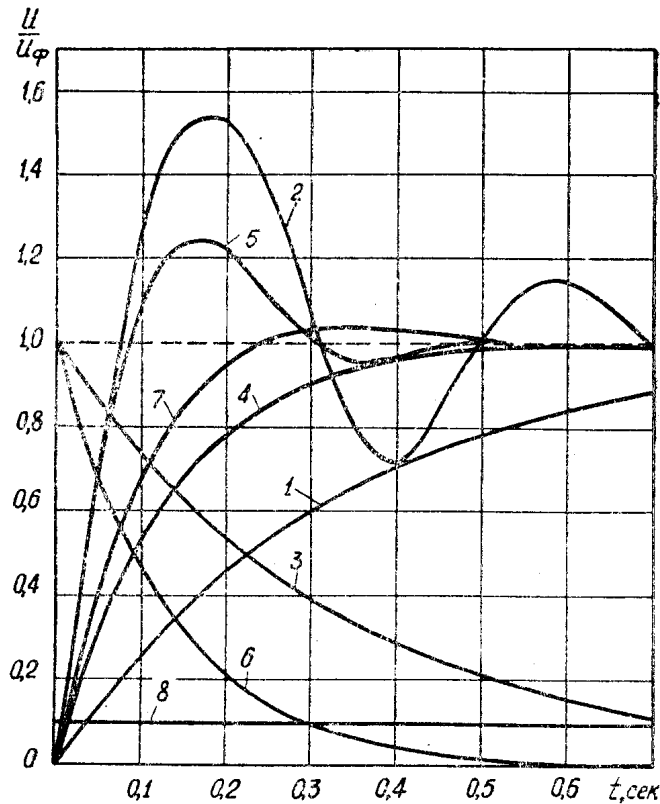


Рис. 3. Кривые, характеризующие скорость нарастания напряжения на поврежденной фазе (1, 2, 4, 5, 7) и затухание напряжения смещения нейтрали (3, 6) при неустойчивом замыкании на землю

вероятность повторного пробоя с увеличением расстройки катушки, естественно, возрастает.

Положим, что повторное зажигание дуги наступит в момент  $t=0,15$  сек, когда  $U_d=1,5 U_{\phi}$  и  $U_{cm} \approx 0,6 U_{\phi}$ . Если при прохождении тока через нулевое значение последует обрыв дуги, то условия для ее окончательного погасания будут менее благоприятны, чем прежде. Напряжение смещения нейтрали принимает значение  $U'_{cm} > U_{\phi}$ , а максимальное напряжение на поврежденной фазе достигнет более высокого значения по сравнению с предыдущим случаем. Если дуга не примет устойчивый характер, то в результате перенапряжений повышается вероятность пробоя в другой точке обмотки статора.

На рис. 3 приведены кривые 4, 5 и 6, которые в отличие от кривых 1, 2 и 3 построены при  $d_k = 0,05$ . Видно, что при резонансной настройке катушки активные потери влияют лишь на скорость нарастания напряжения на поврежденной фазе (кривые 1 и 4). При наличии расстройки катушки (кривые 2 и 5) на скорость нарастания напряжения в начальный момент потери практически не влияют, но оказывают влияние на максимальное значение напряжения  $U_{дм}$ .

Таким образом, в случае работы с заметной расстройкой дугогасящей катушки при более высоких потерях в колебательном контуре условия гашения дуги при неустойчивых замыканиях будут благоприятнее.

На рис. 3 показана также кривая 7, построенная при  $d_k = 0,05$  и  $v_1 = -0,04$ . Сравнивая кривые 4 и 7, с одной стороны, и кривую 2 — с другой, можно сделать вывод, что при более высоких активных потерях, но при резонансной или близкой к ней настройке катушки эффективность ее использования оказывается заметно выше, чем при более низких потерях, но значительной расстройке.

Практически при расстройке порядка 10% и выше увеличение потерь в колебательном контуре следует рассматривать как положительный фактор. При этом суммарные потери должны составлять примерно 5—6%, а какими сопротивлениями они вызваны — принципиального значения не имеет.

Для генераторов с непосредственным охлаждением обмотки статора водой необходимо учесть потери, обусловленные эквивалентным активным сопротивлением утечки  $R_{yэ}$  в виде коэффициента успокоения

$$d_c = \frac{1}{3R_{yэ}\omega C_r} \quad (14)$$

В этом случае коэффициент затухания

$$\delta = \frac{d}{2} \omega, \quad (15)$$

где

$$d = d_k + d_c \quad (16)$$

### Определение выдержки времени защиты

Напряжение срабатывания защиты на рис. 2 показано в виде горизонтальной линии 11, ордината которой  $\frac{U}{U_\phi} = 0,15$ . Видно, что отстройка от напряжения  $U_{0\text{эл.ст}}$  в ряде случаев привела бы к значительному загроблению защиты.

В связи с введением защиты на отключение генератора с небольшой выдержкой времени необходимо отметить условия, при которых может быть обеспечена наибольшая эффективность использования катушек.

При устойчивом замыкании после затухания свободной составляющей емкостного тока переходный процесс в месте замыкания определяется свободной составляющей тока дугогасящей катушки. Максимальная величина этого тока примерно равна емкостному току установившегося режима. При отсутствии катушки в месте повреждения протекает емкостный ток генератора, который при наличии защиты с небольшой выдержкой времени не может вызвать серьезного повреждения стали статора. В этом случае применение катушки для компенсации емкостного тока очевидного преимущества не дает.

При неустойчивом повреждении после обрыва дуги под действием напряжения смещения нейтрали (например, кривая 3, рис. 3) реле будет держать якорь притянутым до тех пор, пока напряжение не снизится до величины, обеспечивающей его отпускание,  $U_{*отп}$ . Принимая  $U_{*сп} = 0,15$ , получим

$$U_{*отп} = \frac{K_v \cdot U_{*сп}}{K_n} \approx 0,1, \quad (17)$$

где  $K_v = 0,8$  — коэффициент возврата,

$K_n = 1,2$  — коэффициент надежности.

Это напряжение показано на рис. 3 в виде горизонтальной линии 8, ордината которой  $\frac{U}{U_\phi} = 0,1$ .

Нетрудно заметить, что, если выдержка времени защиты выбрана без учета времени затухания напряжения смещения нейтрали, то, несмотря на кратковременный характер замыкания с последующим успешным гашением дуги, защита может отключить генератор. При этом дугогасящая способность катушки не будет использована, в результате чего эффективность ее применения ставится под сомнение.

Повысить быстродействие защиты с учетом сохранения генератора в работе при неустойчивых замыканиях на землю можно путем увеличения потерь в колебательном контуре.

Величину расчетного времени затухания  $t_{з.расч.1}$  найдем из выражения, характеризующего процесс затухания от  $\frac{U_{см}}{U_\phi}$  до  $U_{*отп}$ , при котором защита возвращается в исходное состояние

$$\frac{U_{см}}{U_\phi} \cdot e^{-\delta t_{з.расч.1}} = U_{*отп}. \quad (18)$$

Полагая максимальное напряжение смещения нейтрали после обрыва дуги  $U_{см} = 1,2 U_\phi$  [4] и подставляя вместо  $U_{*отп} = 0,1$  (17) и  $\delta = \frac{d}{2}$  (16), после некоторых преобразований получим

$$t_{з.расч.1} = \frac{1,58}{d} 10^{-2}. \quad (19)$$

Вторым условием для определения выдержки времени является селективность защиты при замыканиях на землю на стороне высшего напряжения блока. Выдержка необходима потому, что после снятия блокировки процесс затухания напряжения смещения нейтрали и действие защиты будут протекать аналогично тому, как это рассмотрено выше.

В большинстве случаев напряжение  $U_{о.эл.ст} < U_{см} = 1,2 U_\phi$ , поэтому расчетное время затухания, определенное по второму условию,  $t_{з.расч.2}$  будет меньше  $t_{з.расч.1}$ , полученного согласно (19). Поэтому в качестве выдержки времени защиты с учетом сохранения генератора в работе при неустойчивых замыканиях на землю можно принять

$$t_{сп} = t_{з.расч.1} = \frac{1,58}{d} \cdot 10^{-2}.$$

Если расчет ведется без учета  $t_{з.расч.1}$ , то необходимо определить максимальное значение напряжения  $U_{о.эл.ст.м}^{(B)}$  по выражению (9) или графически с помощью кривых рис. 2 и затем найти  $t_{з.расч.2}$ . Следует



отметить исключительно благоприятное влияние увеличения потерь на снижение  $t_{з.расч.2}$ . Так, например, при  $d \geq 0,05$  она практически не превысит  $0,2$  сек.

### Выводы

1. Показано, что при работе блочного трансформатора с заземленной нейтралью напряжение  $U_{о.эл.ст}$  не должно заметно превышать величины  $0,5 U_{ф}$ . Однако при отсутствии точных данных емкости  $C_{т.мо}$  требуется экспериментальная проверка этого вывода.

2. При необходимости ограничения  $U_{о.эл.ст}$  следует отдать предпочтение работе дугогасящей катушки с настройкой, по возможности близкой к резонансной, но при более высоких активных потерях. В этом случае эффективность действия катушки будет выше.

3. Дугогасящие свойства катушки могут быть реализованы только в том случае, если при определении выдержки времени защиты, действующей на отключение генератора, учитывать переходный процесс после обрыва дуги.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Федосеев. Основы релейной защиты. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
  2. Руководящие указания по релейной защите, вып. 5. Защита блоков генератор-трансформатор и генератор-автотрансформатор. М.—Л., «Энергия», 1963.
  3. Р. Вильгейм и М. Уотерс. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
  4. А. И. Долгинов. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. М., «Энергия», 1968.
  5. П. В. Борисоглебский, Л. Ф. Дмоховская и др. под общей редакцией Д. В. Разевига. Техника высоких напряжений. М.—Л., «Энергия», 1964.
-