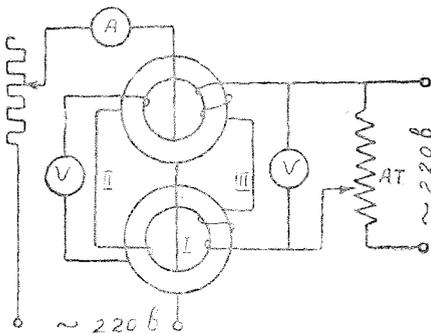


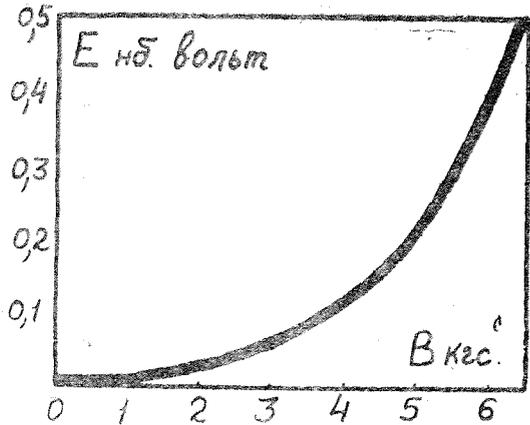


образец трансформатора с произвольным числом витков обмоток и сечением сердечника. Например, можно сечение сердечника взять равным 20 кв. см по 10 кв. см на пакет, а вторичную и подмагничивающие обмотки намотать по 100 витков каждую.

Так как различные старые трансформаторы, изготовленные в различное время, могут иметь сталь с неодинаковыми свойствами, то отбор стали для сердечника опытного трансформатора необходимо сделать после тщательного перемешивания всего количества стали, приготовленного для изготовления трансформаторов.



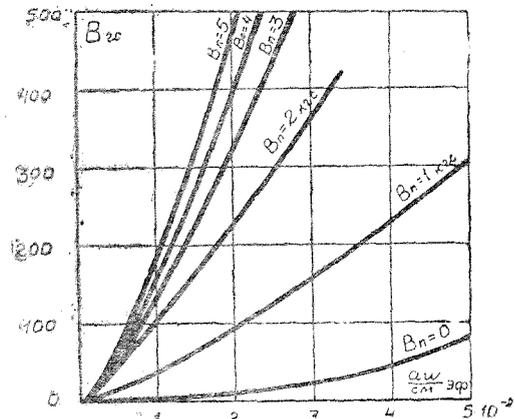
Фиг. 1



Фиг. 2

Для получения данных опытный трансформатор включается по схеме фиг. 1. Вместо первичной обмотки нужно пропустить в окно трансформатора прямой проводник I так, чтобы он загибался в сторону не ближе 25—30 см от сердечника. В цепь этого провода включается амперметр со шкалой на 5 а и регулировочное сопротивление. В цепь вторичной обмотки II включается электронный вольтметр, позволяющий измерять напряжения от 0,1 до 5 в. Питание обмотки подмагничивания III рекомендуется осуществлять через автотрансформатор АТ, так как применение движкового реостата может исказить кривую напряжения подмагничивания.

В начале опыта снимают зависимость э. д. с. небаланса  $E_{нб}$ , создаваемой обмоткой подмагничивания, в зависимости от индукции подмагничивания  $B_n$  и строится кривая  $E_{нб} = f(B_n)$ , как это показано на фиг. 2. Величина  $E_{нб}$  при  $B_n \leq 3000$  гс не должна превышать нескольких сотых долей вольта.



Фиг. 3

Затем снимается ряд кривых намагничивания при индукции подмагничивания, равной 0; 1000; 2000; 3000 гс, и эти кривые строятся в виде указанных на фиг. 3, где по оси абсцисс отложены удельные ампервитки, а по оси ординат—индукция в гс. Как видно из кривых фиг. 2 и 3, снятых для опытного трансформатора с сечением сердечника 20 кв. см и с обмотками по 100 витков каждая, применять индукцию подмагничивания свыше 2000—3000 гс не целесообразно, так как это может дать незначи-

тельное увеличение чувствительности защиты, но может резко увеличить  $E_{нб}$  и приводить к ложной ее работе. Кривые фиг. 3 используются для расчета защиты. Эти кривые близки к прямым и поэтому позволяют получить простую аналитическую зависимость индукции от удельных намагничивающих ампервитков следующего вида:

$$B_p = k a \omega, \quad (1)$$

где  $k$  — угловой коэффициент, определяемый по координатам какой-либо точки, лежащей на кривой намагничивания с выбранным значением  $B_n$ ,

$B_p$  — рабочая индукция трансформатора.

В целях получения наибольшей чувствительности защиты при неизменном первичном токе трогания  $I_{рТ}$  трансформатор должен отдавать во вторичную цепь максимальную мощность. Это условие соблюдается при равенстве сопротивлений холостого хода трансформатора  $z_0$  и сопротивления реле <sup>1)</sup>  $z_p$ :

$$z_0 = z_p. \quad (2)$$

В том случае, когда схема защиты содержит  $m$  параллельно соединенных трансформаторов тока, выражение (2) будет иметь вид:

$$z_0 = m z_p. \quad (3)$$

Ток холостого хода трансформатора  $i_0$  и ток трогания реле  $i_{рТ}$  на основании (3) будут находиться в следующем соотношении:

$$i_{рТ} = m i_0. \quad (4)$$

Используя соотношения (1)—(4) и кривые намагничивания фиг. 3, можно произвести расчет трансформатора и защиты.

В прилагаемой табл. 1 приведены технические данные высокочувствительных токовых реле типа ЭТД—551, которые можно использовать для расчета защиты.

Таблица 1

Исполнение реле	Последовательное соединение катушек		Параллельное соединение катушек	
	ток срабатывания, <i>ма</i>	сопротивление, <i>ом</i>	ток срабатывания, <i>ма</i>	сопротивление, <i>ом</i>
ЭТД—551/40	10—20	80	20—40	20
ЭТД—551/50	12,5—25	52	25—50	13
ЭТД—551/60	15—30	36	30—60	9

### Расчет защиты

В начале расчета, пользуясь данными табл. 1, выбирают тип реле, ток трогания  $i_{рТ}$  и устанавливают величину сопротивления реле  $z_p$  и соединительных проводов— $r_n$ . Тогда полное сопротивление вторичной цепи трансформатора

$$z_{рн} = \sqrt{(r_n + r_p)^2 + x_p^2}, \quad (5)$$

где  $r_p$  и  $x_p$  — составляющие сопротивления  $z_p$ . Величину  $r_p$  можно определить мостиком.

<sup>1)</sup> См. Г. В. Зевеке. Дифференциальные защиты электрических машин. „Электрические станции“ № 1, 1940 г.

Удельные ампервитки намагничивания можно выразить с учетом (4) через ток трогания следующим образом:

$$aw = \frac{i_0 w_2}{l} = \frac{i_{PT} w_2}{ml}, \quad (6)$$

где  $w_2$  — число витков вторичной обмотки и  
 $l$  — длина средней силовой линии.

Тогда рабочая индукция  $B_p$  на основании (1) и (6):

$$B_p = \frac{ki_{PT} w_2}{ml}. \quad (7)$$

Воспользуемся теперь выражением для вторичной э.д.с. при токе трогания реле

$$E_2 = 222 q w_2 B_p \cdot 10^{-8} = i_{PT} z_{pn}. \quad (8)$$

Подставив значение  $B_p$  из (7) в (8), получим выражение для вторичного числа витков:

$$w_2 = 10^4 \sqrt{\frac{ml z_{pn}}{222 k q}}. \quad (9)$$

Задавшись сечением сердечника  $q$ , по выражению (9) вычисляют вторичное число витков  $w_2$ . Затем, по выражению (6) определяют удельные ампервитки  $aw$  и, пользуясь кривой намагничивания фиг. 3, находят рабочую индукцию  $B_p$ . Расчет можно проверить путем определения э.д.с.  $E_2$  из (8) и сравнения ее с произведением  $i_{PT} \cdot z_{pn}$ . В том случае, если выражение (8) не удовлетворяется, в расчет вносится поправка путем выбора нового значения  $k$ , соответствующего полученной при расчете индукции  $B_p$ .

Число витков подмагничивающих обмоток  $w_n$  определяется выбранной индукцией подмагничивания  $B_n$  с учетом того, что к каждой обмотке пакета подводится от источника тока половина напряжения ( $0,5 U_n$ ) и сечение пакета равно  $0,5q$ :

$$w_n = \frac{0,5 U_n \cdot 10^8}{222 \cdot 0,5 q B_n} = \frac{U_n \cdot 10^{-8}}{222 q B_n}. \quad (10)$$

Если защита содержит  $m$  параллельно соединенных трансформаторов, обмотки подмагничивания которых предполагается включить последовательно, то число витков обмотки подмагничивания

$$w_n = \frac{U_n \cdot 10^8}{222 m q B_n}, \quad (11)$$

где  $U_n$  — напряжение источника, питающего обмотки подмагничивания.

На каждый пакет сердечника должно быть намотано по  $w_n$  витков. Максимальный ток в реле с учетом (3):

$$i_{p,m} = \frac{I_{3,m}}{w_2} \frac{z_0}{z_0 + m z_p} = \frac{I_{3,m}}{2 w_2}. \quad (12)$$

Этот ток может быть положен в основу выбора сечения провода вторичной обмотки. Для определения тока, потребляемого обмоткой подмагничивания, необходимо снять кривую намагничивания стали на переменном токе до  $B = B_n$ . Отключив обмотку подмагничивания в схеме фиг. 1, постепенно увеличивают ток в первичной обмотке и замеряют напряжения на вторичной.

По первичному току находят намагничивающие удельные ампервитки, а по напряжению—индукцию и строят кривую намагничивания. По этой кривой для выбранной индукции  $B_n$  находят ампервитки  $a\omega_n$ . Тогда ток подмагничивания определяют из выражения:

$$i_n = \frac{a\omega_n l}{\omega_n} \quad (13)$$

Мощность, расходуемая для подмагничивания,

$$S_n = u_n \cdot i_n \quad (14)$$

Определим теперь первичный ток трогания защиты  $I_{PT}$ . При этом будем считать ток холостого хода  $i_0$  чисто реактивным и учтем соотношение (4).

Тогда первичный ток трогания:

$$\begin{aligned} I_{PT} &= \omega_2 \sqrt{(I_{PT} \cos \varphi_p)^2 + (I_{PT} \sin \varphi_p + m i_0)^2} = \\ &= \omega_2 I_{PT} \sqrt{\cos^2 \varphi_p + (\sin \varphi_p + 1)^2} = \\ &= \omega_2 I_{PT} \sqrt{2 + 2 \frac{x_p}{z_{PI}}} \end{aligned} \quad (15)$$

Мертвая зона защиты:

$$b_0 = \frac{I_{PT}}{I_{3m}} 100, \quad (16)$$

где  $I_{3m}$  — максимальный ток замыкания на землю.

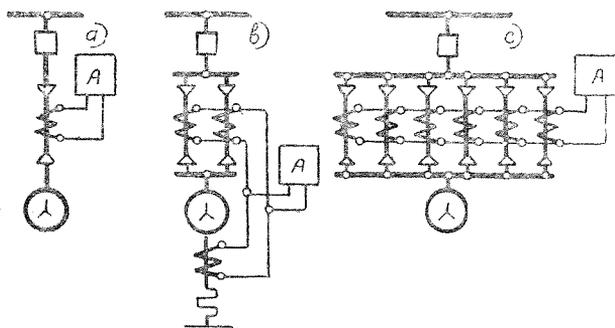
Ток  $I_{3m}$  при изолированных нейтральных сети данного напряжения будет равен емкостному току замыкания на землю  $I_c$  этой сети. Если некоторые нейтралы сети заземлены через активное сопротивление, то ток  $I_{3m}$  будет содержать и активную составляющую.

Тогда

$$I_{3m} = \sqrt{I_{3a}^2 + I_c^2} \quad (17)$$

В сетях с компенсированной нейтралью ток  $I_{3m}$  будет равен остаточному току в месте пробоя изоляции.

В табл. 2 приведены примеры расчета подобной защиты, выполненной по схемам *a*, *d* и *c* фиг. 4. Каждая схема рассчитана в двух вариантах: для реле ЭТД—551/40 и ЭТД—551/60.



Фиг. 4

Соотношение между сопротивлениями  $r_p$  и  $x_p$  взято ориентировочным. Сердечники трансформаторов имеют  $l = 45,5$  см и сечение  $q = 20$  кв. см. Угловой коэффициент  $k$  при первоначальном расчете принят равным 15300 для всех вариантов, что соответствует рабочей индукции  $B_p = 250$  гс.

Таблица 2

Наименование определяемой величины	Обозначение, величина и формулы	Защита выполняется					
		по схеме а		по схеме в		по схеме с	
		вар. 1	вар. 2	вар. 1	вар. 2	вар. 1	вар. 2
1. Мощность генераторов в <i>мгвт</i> . . . . .		3	3	6	6	25	25
2. Число соединительных кабелей . . . . .		1	1	2	2	6	6
3. Число параллельно соединенных трансформаторов . . . . .		1	1	3	3	6	6
4. Тип выбранных реле	<i>m</i>	ЭТД— —551/40	ЭТД— —551/60	ЭТД— —551/40	ЭТД— —551/60	ЭТД— —551/40	ЭТД— —551/60
5. Ток трогания реле в <i>а</i>	<i>i<sub>PT</sub></i>	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03
6. Сопротивления реле в <i>омах</i>	<i>z<sub>p</sub></i> <i>r<sub>p</sub></i> <i>x<sub>p</sub></i>	80 48 64	9 5,4 7,2	80 48 64	9 5,4 7,2	80 48 64	9 5,4 7,2
7. Сопротивление соединительных проводов в <i>омах</i>	<i>r<sub>n</sub></i>	1	1	1	1	1	1
8. Полное сопротивление вторичной цепи из (5) в <i>омах</i>	<i>z<sub>pn</sub></i>	80,5	9,65	80,50	9,65	80,5	9,65
9. Необходимая вторичная э.д.с. при токе трогания в вольтах	<i>i<sub>PT</sub>z<sub>pn</sub></i>	0,805	0,290	0,805	0,290	0,805	0,290
10. Сечение сердечника в <i>кв см.</i>	<i>q</i>	20	20	20	20	20	20
11. Длина средней силовой линии в <i>см</i>	<i>l</i>	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5
12. Индукция подмагничивания в <i>гс</i>	<i>B<sub>n</sub></i>	3000	3000	3000	3000	3000	3000
13. Угловой коэффициент при <i>B=250 гс</i>	<i>k</i>	15300	15300	15300	15300	15300	15300
14. Вторичное число витков из (9)	<i>W<sub>2</sub></i>	73	25	128	44	181	62
15. Удельные ампервитки холостого хода при <i>i<sub>PT</sub></i> из (6)	<i>aw</i>	0,0160	0,0165	0,0091	0,0097	0,0067	0,0068
16. Расчетная индукция при <i>i<sub>PT</sub></i> по фиг. 3	<i>B<sub>p</sub></i>	245	250	115	120	80	80
17. Вторичная э.д.с. трансформатора при <i>i<sub>PT</sub></i> из (8)	<i>E<sub>2</sub></i>	0,800	0,28	0,653	0,236	0,642	0,22
18. Угловой коэффициент при <i>B<sub>p</sub></i>	<i>k</i>	—	—	12600	12600	11800	11800
19. Вторичное число витков из (9)	<i>w<sub>2</sub></i>	—	—	140	48	205	71
20. Удельные ампервитки холостого хода при <i>i<sub>PT</sub></i> из (6)	<i>aw</i>	—	—	0,0103	0,0105	0,0075	0,0079
21. Расчетная индукция по фиг. 3	<i>B<sub>p</sub></i>	—	—	130	135	88	90
22. Вторичная э.д.с. при <i>i<sub>PT</sub></i> из (8)	<i>E<sub>2</sub></i>	—	—	0,807	0,288	0,80	0,285
23. Число витков подмагничивающих обмоток при <i>u<sub>n</sub>=105 в</i> из (11)	<i>w<sub>n</sub></i>	790	790	263	263	132	132
24. Первичный ток трогания из (15)	<i>I<sub>PT</sub></i>	1,40	1,40	2,66	2,69	3,9	3,98

При этом оказалось, что трансформаторы защиты по схеме (а) будут иметь индукцию 245 гс для первого варианта и 250 гс для второго. Вторичная э.д.с. для этой схемы оказалась близкой к произведению  $i_{PT}Z_{rn}$  (см. п.п. 9 и 17) и поэтому расчет трансформаторов для защиты по схеме (а) оказался удачным при  $k=15300$ . Для защиты по схемам (б) и (с) вторичная э.д.с. оказалась меньше  $i_{PT}Z_{rn}$ , поэтому для этих защит коэффициент  $k$  пришлось принять в соответствии с полученными при предварительном расчете индукциями для схемы б (при  $B_p=120$  гс)—12600 и схемы в (при  $B_p=80$ )—11800. При этих значениях э.д.с.  $E_2$  оказалась близка к  $i_{PT}Z_{rn}$  для указанных схем (сравните п. п. 9 и 22).

Как видно из табл. 2, рассматриваемую защиту можно осуществить для генераторов всех мощностей. По числу витков вторичной обмотки наиболее приемлемым оказался второй вариант для всех трех схем, так как он дает наименьшее значение  $w_2$ . Сечение сердечника во втором варианте можно было бы уменьшить до 10—15 кв. см, что привело бы к некоторому увеличению  $w_2$ , но уменьшило бы стоимость трансформатора.

Предлагаемый метод расчета рассматриваемой защиты отличается простотой и достаточной точностью. Использование для расчета экспериментальных данных, полученных для имеющейся стали, дает возможность местным релейщикам использовать для выполнения подобных трансформаторов сердечники от старых трансформаторов тока, что приобретает большое значение в настоящих условиях.

В заключение необходимо отметить, что чувствительность рассматриваемой защиты получается весьма высокой для генераторов мощностью до 25 мвт и для двигателей и фидеров всех мощностей.