

**К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ РАСЧЕТЕ ТОКОВ ВНУТРЕННИХ  
КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

К. К. РЯЗАНЦЕВ

(Представлено проф. докт. техн. наук И. Д. Кутявным)

Существующий метод расчета токов при внутренних коротких замыканиях (к. з.) генераторов основывается на следующем [1, 2, 3].

1. Положение точки к. з. на обмотке статора характеризуется долей  $\alpha$  замкнувшихся витков, отсчитанных от нейтрали.

2. Электродвижущая сила  $E_\alpha$ , индуцируемая в замкнутой части каждой фазы, приблизительно пропорциональна  $\alpha$ , т. е.

$$E_{\phi\alpha} = \alpha E_\phi, \quad (1)$$

где  $E_{\phi\alpha}$  — фазная э. д. с., соответствующая  $\alpha = 1$ .

3. Магнитный поток двухполюсного генератора, сцепляющийся с каждым из витков фазы, состоит из двух частей: первая из них сцепляется только с данным витком („собственный поток“ —  $\Phi_c$ ), а вторая пронизывает все витки обмотки фазы („общий поток“ —  $\Phi_{об}$ ). Поток рассеяния пазовой части обмотки является собственным потоком. Поток рассеяния лобовых соединений и результирующий поток, созданный совместным действием статора и ротора, — общие потоки.

4. Индуктивное сопротивление фазы статора состоит из двух слагаемых  $x_c$  и  $x_{об}$ , определяемых потоками  $\Phi_c$  и  $\Phi_{об}$ .

Индуктивное сопротивление замкнувшейся части в первом приближении равно

$$x_\alpha = \alpha x_c + \alpha^2 x_{об}. \quad (2)$$

Активное сопротивление той же части витков определяется соотношением

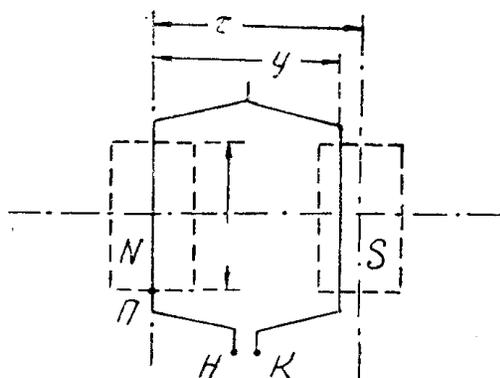
$$r_\alpha = \alpha r,$$

где  $r$  — сопротивление всей фазы.

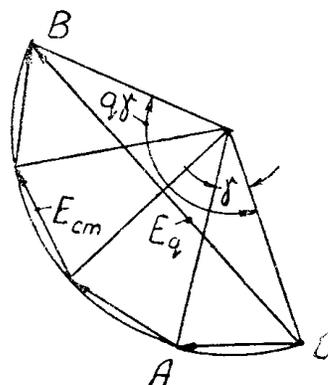
Рассмотрим более подробно эти положения, имея целью внесение некоторых уточнений в определение сопротивлений отдельных частей генератора. При этом будем иметь в виду случай симметричного трехфазного к. з. внутри ненагруженного двухполюсного турбогенератора, отсоединенного от сборных шин станции.

### Оценка расстояния до точки к. з.

Оценка расстояния от нейтрали до места повреждения величиной  $\alpha$  не всегда дает возможность правильно подсчитать ток к. з. Мешают этому три обстоятельства. Первое из них состоит в том, что каждый виток статора имеет только две активные стороны (фиг. 1), длина



Фиг. 1.



Фиг. 2.

которых, по данным [4], у генераторов, мощностью 12—50 мвт, составляет только 46—68 % длины витка, вследствие чего пренебрегать длиной лобовых частей нельзя. Отсюда следует, что при подсчете по выражению (1) э. д. с. и ток, соответствующие точке к. з., будут найдены верно, если место повреждения отсекает часть витка, в которой индуцируется такая же часть витковой э. д. с. Это имеет место в тех случаях, когда замыкается целое число витков или дробное, но кратное 0,25 (фиг. 1).

Второе обстоятельство, из-за которого выражение (1) является неточным даже при целом числе замкнувшихся витков, состоит в том, что э. д. с. стержней  $E_{cm}$  двух соседних пазов сдвинуты на угол [5]

$$\gamma^\circ = \frac{360 p}{Z},$$

где  $p$  — число пар полюсов,  $Z$  — число пазов статора.

При последовательном соединении  $q$  стержней, лежащих под одним полюсом, результирующая э. д. с.  $E_q$  получается путем геометрического сложения векторов  $E_{cm}$  (фиг. 2), и поэтому она меньше произведения  $q E_{cm}$ . Это учитывается коэффициентом распределения обмотки  $\kappa_p$ , который (для основной гармоники) равен

$$\kappa_p = \frac{E_q}{q E_{cm}} = \frac{\overline{OB}}{q \overline{OA}} = \frac{\sin \frac{q \gamma}{2}}{q \sin \frac{\gamma}{2}} < 1.$$

Так как у турбогенератора целое число пазов на полюс и фазу и, кроме того, расположение пазов фазы под обоими полюсами одинаковое, то найденный выше коэффициент распределения будет иметь значение также для всей обмотки в целом. Поэтому

$$E_\phi = \omega E_s \kappa_p,$$

где  $E_{\phi}$  — э. д. с. одного витка, а  $\omega$  — число витков фазы.

Если число витков сократится до значения  $\alpha\omega$ , то новое значение фазной э. д. с. будет составлять

$$E_{\phi\alpha} = \alpha\omega E_{\phi} k_{p\alpha} > \alpha E_{\phi},$$

так как  $k_{p\alpha} > k_p$ .

При определении  $k_{p\alpha}$  надо иметь в виду, что при  $\alpha < 1$  симметрия полугрупп витков, лежащих под обоими полюсами, нарушается, и для каждой полугруппы витков будет свой  $k_{p\alpha}$ .

Однако учитывать изменение  $k_{p\alpha}$  надо лишь при к. з. в первых от нейтрали витках, поскольку здесь будет наибольшая погрешность при подсчете  $E_{\phi\alpha}$  по выражению (1).

Третье обстоятельство заключается в том, что при перемещении места к. з., например от точки  $H$  до точки  $\Pi$  (фиг. 1), значение  $\alpha$  увеличивается, а вслед за ним возрастает первый член правой части выражения

$$x_{\alpha} = \alpha x_c + \alpha^2 x_{об},$$

чего не должно быть, так как  $x_c$  представляет собой сопротивление пазовой части. Этим вносится дополнительная неточность в определение т. к. з. опять-таки, если не выполнено условие о кратности числа  $\alpha\omega$  четверти витка. Чтобы избежать ошибки при любом значении  $\alpha$ , следует находить э. д. с. и сопротивления по отдельным участкам цепи к. з., имея перед собой схему обмотки статора.

### Зависимость сопротивлений генератора от значения $\alpha$

Активное сопротивление  $r$ .

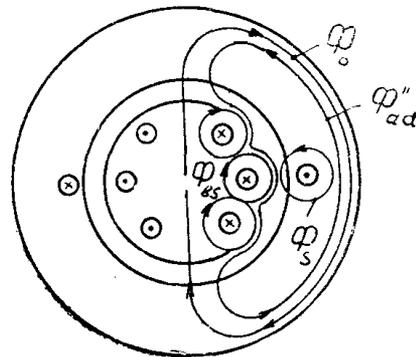
Активное сопротивление фазы генератора имеет небольшую величину. Например, у турбогенератора Т2—100—2 оно равно 0,00216 ом при  $75^{\circ}$ . Активное сопротивление следует учитывать при определении т. к. з. при повреждении вблизи нейтрали. Оно может определяться по выражению

$$r_{\alpha} = \alpha r.$$

Индуктивное сопротивление  $x_{об}$ , соответствующее по току реакции статора.

Зависимость индуктивного сопротивления замкнувшейся части фазы от  $\alpha$  является сложной и учесть ее, как это видно из дальнейшего, можно только приближенно. Выясним это, рассмотрев упрощенную картину магнитных потоков, соответствующую начальному моменту к. з.

До возникновения короткого замыкания существует поток в воздушном зазоре  $\Phi_0$  и поток рассеяния обмотки возбуждения  $\Phi_{\theta s}$  (фиг. 3). Появляющийся ток короткого замыкания создает магнитный поток, который можно разделить на поток реакции статора  $\Phi''_{ad}$  и потоки рассеяния  $\Phi_s$ . Поток  $\Phi''_{ad}$  проходит по статору, воздушному зазору, а также по путям рассеяния успокоительной системы и обмотки возбуждения ротора. Потоки рассеяния  $\Phi_s$  охватывают пазовую и лобовую части обмотки статора.



Фиг. 3.

Согласно [1], можно ориентировочно принять, что поток продольной реакции представляет собой общий поток, сцепляющийся со всей обмоткой каждой фазы. Имея в виду, что основными сопротивлениями для него являются воздушный зазор и пути рассеяния, можно написать

$$x''_{об} = \omega L''_{об} = \omega \tau^2 \lambda''_{об}, \quad (3)$$

где  $\lambda''_{об}$  — магнитная проводимость для потока продольной реакции статора.

На основании выражения (3) можно предполагать, что сопротивление  $x''_{об}$  имеет квадратичную зависимость от числа замкнутых витков  $\alpha \tau$ . В целом получается аналогия с изменением сопротивления последовательно соединенных катушек, охватывающих общий магнитопровод и имеющих по одному витку, т. е.

$$x''_{об \alpha} = \omega (\alpha \tau)^2 \lambda''_{об} = \alpha^2 x''_{об} = \alpha^2 (x'_d - x_s). \quad (4)$$

Соответственно для переходного и установившегося режима имеем

$$x'_{об \alpha} = \alpha^2 (x'_d - x_s), \quad (5)$$

$$x_{об \alpha} = \alpha^2 (x_d - x_s) = \alpha^2 x_{ad}. \quad (6)$$

Индуктивное сопротивление  $x_n$ , соответствующее потоку пазового рассеяния.

Поток рассеяния обмотки статора  $\Phi_s$  делится на следующие слагающие:

1) поток пазового рассеяния; 2) поток рассеяния лобовых частей; 3) поток зубцового рассеяния; 4) поток рассеяния в фазных зонах или поток поясового рассеяния [7].

Согласно [8], обусловленная последними двумя слагающими доля всего сопротивления рассеяния  $x_s$  составляет только 3%, и поэтому они ниже не рассматриваются.

Поток рассеяния поперек каждого паза статора можно рассматривать существующим отдельно от таких же потоков соседних пазов [8]. Поэтому при однослойной обмотке изменение числа замкнутых витков статора подобно изменению числа последовательно соединенных одновитковых катушек, не имеющих общего магнитопровода [1]. Это позволяет принять, что в этом случае индуктивное сопротивление обмотки, лежащей в пазах, линейно зависит от  $\alpha$ , т. е.

$$x_{n \alpha} = \alpha x_n. \quad (7)$$

Здесь  $x_n$  — сопротивление всей пазовой части обмотки одной фазы.

Но такое выражение, как было указано выше, правильно отражает действительную зависимость  $x_n$  от  $\alpha$  лишь при целом числе витков или дробном, но кратном 0,25.

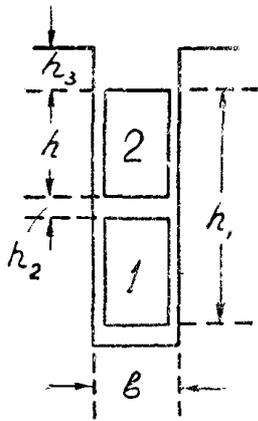
В современных турбогенераторах применяются исключительно двухслойные петлевые обмотки с укороченным шагом с целым числом пазов на полюс и фазу [6,9]. Выражения для подсчета индуктивного сопротивления пазовой части такой обмотки можно найти, например, в [4, 7, 8, 9]. Ниже приводится одна из них, взятая из [9]:

$$x_n = k_x \frac{2pl}{Z} \cdot \frac{3\beta + 1}{4} \cdot \frac{h_1 + 3h_3}{3b}, \quad (8)$$

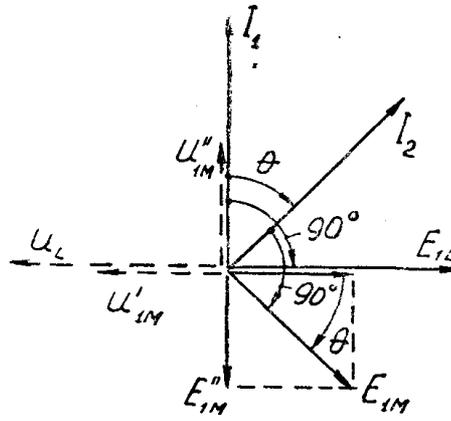
где при соединении фаз в звезду

$$\kappa_x = 0,407 \left( \frac{\omega}{10} \right)^2 \frac{I}{p U},$$

$l$  — активная длина статора в см,  
 $\beta$  — относительный шаг обмотки,  
 $I, U$  — ток и напряжение статора,  
 $\omega$  — число витков одной фазы.  
 Остальные обозначения см. на фиг. 4.



Фиг. 4.



Фиг. 5.

Так как в пазу находятся два стержня, то число пазов статора равно  $Z = 3\omega$ , если обмотка не имеет параллельных ветвей.

Подставив выражения для  $Z$  и  $\kappa_x$  в (8), получим

$$x_n = 2,26 \cdot 10^{-4} \frac{I}{U} l (3\beta + 1) \frac{h_1 + 3h_3}{8} \omega = c \cdot \omega. \quad (9)$$

Откуда следует, что  $x_n$  прямо пропорционален числу витков фазы  $\omega$ . Это, казалось бы, дает основание находить значение  $x_{n\alpha}$ , как и для однослойной обмотки, по выражению [7]. Однако, идя этим путем, можно получить ошибку, особенно при к. з. в первых от нейтрали витках. Дело в том, что в пазу лежат два стержня, находящиеся в неодинаковых условиях и принадлежащие различным виткам.

Коэффициенты само- и взаимоиндукции стержней можно найти по выражениям (см. фиг. 4):

$$L_1 = \mu_0 \frac{4h + 3h_2 + 3h_3}{3b} l, \quad (10)$$

$$L_2 = \mu_0 \frac{h + 3h_3}{3b} l, \quad (11)$$

$$M = \mu_0 \frac{h + 2h_3}{2b} l. \quad (12)$$

Например, у одного турбогенератора соотношения между коэффициентами, подсчитанными по (10—12), оказались следующие:

$$L_1 : L_2 : M = 100 : 23,9 : 48,4.$$

Э. д. с. само- и взаимной индукции  $E_L$  и  $E_M$ , возникающие в каждом из стержней, сдвинуты по фазе на угол  $\Theta$  так же, как и токи в стержнях (фиг. 5). Для определения эквивалентной индуктивности, например первого стержня, разложим э. д. с. взаимной индукции

$$E_{1M} = -\omega M I_2$$

на слагающие

$$E'_{1M} = -\omega M I_2 \cos \Theta; \quad E''_{1M} = -\omega M I_2 \sin \Theta.$$

Напряжение, приложенное к концу стержня, должно иметь слагающие

$$U_L = -E_{1L}; \quad U'_{1M} = -E'_{1M}; \quad U''_{1M} = -E''_{1M}.$$

Первые две слагающие можно учесть простым суммированием, а именно:

$$U_L + U'_{1M} = \omega(L + M \cos \Theta) I_1,$$

так как  $I_1$  и  $I_2$  равны по абсолютной величине. Третья слагающая по своему характеру соответствует активному падению напряжения, совпадая по фазе с током  $I_1$ . Она может быть учтена введением в схему замещения генератора фиктивного сопротивления

$$r_\phi = \omega M \sin \Theta.$$

Исходя из этого, можно написать:

$$U''_{1M} = \omega M I_1 \sin \Theta = r_\phi I_1.$$

Углы сдвига по фазе  $\Theta$  между токами в верхнем и нижнем стержнях паза зависят от сокращения шага [8]. Они одинаковы во всех пазухах лишь при трех значениях шага:  $\tau$ ,  $2/3 \tau$ ,  $1/3 \tau$ . При этом углы сдвига соответственно равны  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $120^\circ$ .

При промежуточных значениях шага равенства углов уже нет. Для выяснения этого следует на схеме обмотки статора показать направления токов, начиная от нейтрали. Например, для одного генератора этим способом выяснено, что у каждой группы витков в восьми пазухах  $\Theta = 0$ , в четырех пазухах  $\Theta = +60$  и последних четырех пазухах он равен  $-60$ . При внутреннем к. з. токи в обоих слоях каждого паза протекают не при любом расположении места повреждения, а только при определенном удалении его от нейтрали, что можно проследить по схеме обмотки. Поэтому сопротивление, найденное по выражению [7], будет значительно отличаться от действительного вследствие отсутствия э. д. с. взаимной индукции. Отсюда следует, что при малых значениях  $\alpha$  нужно находить сопротивление для некоторых пазов и витков по отдельности. Отметим, кроме того, что для получения возможно больших т. к. з. у нейтрали к последней должен прикрывать верхний стержень с меньшей индуктивностью пазовой части.

Индуктивное сопротивление  $x_d$ , соответствующее потоку рассеяния лобовых частей.

Обычно статор турбогенератора имеет корзиночные лобовые соединения, располагающиеся в конических поверхностях [6, 7]. Часть их показана на фиг. 6, взятой из [4]. Длина лобовых частей у гене-

раторов, мощностью  $12 \div 50$  мгва, составляет  $54 - 32$  % длины витка обмотки статора. Доля сопротивления, обусловленного потоками рассеяния вокруг этих частей, равна приблизительно 65 % от всего сопротивления рассеяния. Поэтому очевидна важность выяснения зависимости  $x_{л}$  от  $\alpha$ .

Токи в проводниках (фиг. 6) можно разложить на аксиальные  $I_a$  и тангенциальные слагающие  $I_t$ . Первые из них создают вращающийся поток, подобно тому, как это происходит в воздушном зазоре. Для тангенциальных токов лобовые части представляют систему кольцевых проводников, охватываемых своими полями [7]. К этому надо добавить, что в лобовых соединениях находятся в непосредственной близости друг с другом проводники, обтекаемые токами, сдвинутыми по фазе на неодинаковые углы.

На поля рассеяния и, следовательно, на  $x_{л}$ , в частности, оказывают влияние сокращение шага обмотки и материал стали бандажа ротора.

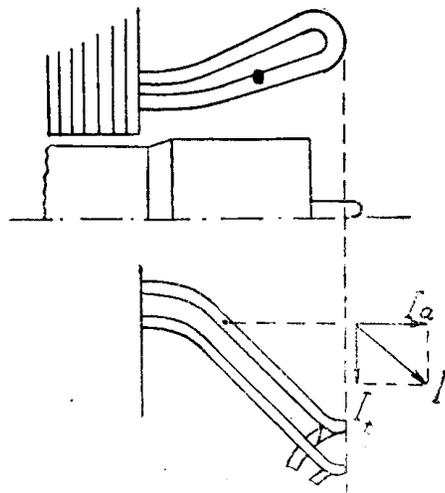
Картина магнитного поля вокруг лобовых соединений является сложной, вследствие чего учет рассеяния в этом месте генератора оказывается более трудным, чем в пазовых частях. Этим, видимо, объясняется расхождение в результатах, даваемых различными формулами при подсчете  $x_{л}$  даже для всей фазы в целом.

По мере уменьшения  $\alpha$  все большее число проводников оказывается без тока и сильнее искажается первоначальная картина полей рассеяния, опираясь на которую были выведены формулы для сопротивления фазы в целом. Поэтому выражение для  $x_{л\alpha}$  будет давать значения со все возрастающей погрешностью по мере приближения к наиболее важной области около нейтрали. Представляется целесообразным при малых значениях  $\alpha$  использовать другой путь расчета сопротивления, например описанный в [10] метод участков, с учетом особенностей лобовых частей (конфигураций, наличия взаимной индукции между соседними проводниками и т. д.).

### Выводы

1. Как указывают сами авторы метода [1], предлагаемые ими выражения для определения э. д. с. и индуктивного сопротивления верны лишь в первом приближении.

2. В настоящей статье выяснено следующее: 1) э. д. с. и индуктивные сопротивления определяются по выражениям (1, 2) с наименьшей точностью при коротком замыкании в витках, расположенных у нейтрали; 2) для избежания ошибки при любом значении  $\alpha$  следует находить э. д. с. и сопротивления по отдельным участкам цепи к. з.; 3) сопротивление пазовой части обмотки статора может быть найдено для случая трехфазного к. з. достаточно точно, если учитывается токораспределение в схеме обмотки; 4) необходимо дальнейшее уточнение вопроса о подсчете при  $\alpha < 1$  сопротивления, связанного с существованием потоков рассеяния лобовых частей статора.



Фиг. 6.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин Н. Ф. и Чернин А. Б. Метод расчета токов при внутренних замыканиях в синхронных генераторах, 1937.
2. Костров М. Ф., Соловьев И. И., Федосеев А. М. Основы техники релейной защиты. ГЭИ, 1944.
3. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем. ГЭИ, 1952.
4. Бергер А. Я. Турбогенераторы. Часть II, ОНТИ, 1937.
5. Пиотровский Л. М. Электрические машины. ГЭИ, 1940.
6. Постников И. М. Проектирование электрических машин. ГИТЛ, УССР, 1952.
7. Алексеев А. Е. и Костенко М. П. Турбогенераторы, ГЭИ, 1939.
8. Бергер А. Я., Сысоев В. И. и Васильев В. А. Основные элементы новейшей теории синхронной машины. ОНТИ, 1936.
9. Комар Е. Г. Вопросы проектирования турбогенераторов. ГЭИ, 1955.
10. Калантаров П. Л. и Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники. ГЭИ, 1951.