

УЧЕТ НАСЫЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ПРИ РАСЧЕТЕ ПРОВОДИМОСТИ ПАЗОВОГО РАССЕЯНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

К. А. ХОРЬКОВ, В. С. БАКЛИН

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин и отделом
электрических машин НИИ автоматики и электромеханики)

При расчете коэффициента проводимости пазового рассеяния в первом приближении предполагают бесконечно большую магнитную проницаемость стали. Проводимость пазового рассеяния становится функцией только геометрии паза. Например, для открытых пазов при однослойной обмотке

$$\lambda_n = \frac{h_1}{3b_n} + \frac{h_k}{b_n}, \quad (1)$$

где h_1 — высота меди обмотки,

h_k — высота клина и изоляции между клином и медью,

b_n — ширина паза.

Однако при расчете переходных процессов электрических машин, особенно внезапных коротких замыканий, когда ток в цепи в десятки раз превышает номинальный ток машины, пренебрегать влиянием насыщения стали на параметры обмотки статора становится невозможным. Экспериментальные значения сверхпереходных и переходных индуктивностей синхронных машин значительно меньше их расчетных значений без учета влияния насыщения. Так, в [1 и 2] приведены зависимости $\frac{X''_{dn}}{X_d}$ и $\frac{X'_{dn}}{X_d}$ от кратности тока короткого замыкания. Как

следует из кривых, средняя величина насыщенного значения сверхпереходного сопротивления по продольной оси составляет для двухполюсных турбогенераторов 0,65 его ненасыщенного значения, для четырехполюсных турбогенераторов — 0,77 и для явнополюсных синхронных машин — 0,88.

В [3] приведены насыщенные и ненасыщенные значения сверхпереходного индуктивного сопротивления ударных генераторов для ТИ-25-2 $\frac{X''_{dn}}{X_d} = 0,6$; для ТИ-75-2 $\frac{X''_{dn}}{X_d} = 0,67$. В [4] приведены экспери-

ментальные зависимости X''_{dn} в функции кратности тока короткого замыкания для ТИ-75-2. При токе внезапного короткого замыкания, равном $15I_n$, величина X''_{dn} составляет 0,7 ненасыщенного значения X''_d .

Известные методики расчета параметров с учетом насыщения или слишком приближены или основаны на методе последовательных приближений и требуют большого объема вычислений.

В [5] предлагается учитывать влияние насыщения на проводимость пазового рассеяния с помощью увеличения ширины паза на некоторую величину, равную ширине зубца, деленного на эффективную магнитную проницаемость

$$b'_n = b_n + \frac{b_z}{\mu'} \quad (2)$$

$$\mu' = \frac{B_{зк}}{\mu_0 (H_{зк} + A_N I)}, \quad (3)$$

где

$B_{зк}$ и $H_{зк}$ — «критические» индукция и напряженность по кривой намагничивания, $B_{зк} = 2,04 \cdot 10^{-4} \frac{\delta \delta}{\text{см}^2}$ $H_{зк} = 300 \text{ а/см}$;

A_N — номинальная линейная нагрузка;

I — ожидаемая кратность тока.

Для ударных генераторов кратность тока короткого замыкания значительно превосходит 10-кратное значение номинального тока и расчеты с указанными выше $B_{зк}$ и $H_{зк}$ дают заниженные значения проводимости пазового рассеяния. Например, для ударного генератора ТИ-25-2 при внезапном коротком замыкании в нуль э.д.с. линейная нагрузка $A_N I$ с учетом апериодической составляющей тока получается равной 18,0 ка/см, следовательно, $\mu = 0,87$;

$$b'_n = b_n + \frac{b_z}{0,87} > t_z,$$

что противоречит физическому смыслу и дает явно завышенные значения b'_n .

В [6] находят эквивалентную проводимость паза, предполагая, что индуктивное сопротивление рассеяния пропорционально последовательному соединению пазовой проводимости и проводимости зубцов:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_n \cdot \lambda_z}{\lambda_n + \lambda_z} = \lambda_n \cdot \frac{1}{1 + \frac{b_z}{b_n} \cdot \frac{1}{\mu_e}}, \quad (4)$$

где μ_e — относительная магнитная проницаемость стали зубцов при рассматриваемом насыщении. Величина μ_e определяется по кривой намагничивания по известной линейной нагрузке $A_N I$.

Отличие этой методики от предыдущей только в том, что не лимитируется $B_{зк}$, в принципе методики подобны.

Методика [7] учитывает неравномерное распределение потока по высоте паза, но она еще более громоздка, чем рассмотренные выше, и на практике не находит применения.

Общим недостатком существующих методик расчета насыщенных значений параметров обмотки является то, что все они базируются на знании тока, протекающего по обмотке при внезапном коротком замыкании. Установить же более или менее достоверное значение этого тока можно только после нескольких просчетов электромагнитного расчета ударного генератора, так как величина тока в существенной мере зависит от значения индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора, причем поток рассеяния и ток связаны между собой нелинейно. Из сказанного очевидно, что построить простую методику расчета параметров обмотки с учетом влияния насыщения железа на рассмотренной базе невозможно.

Мы предлагаем базироваться не на величине тока внезапного короткого замыкания, а на величине потокосцепления рассеяния обмотки

статора. Известно, что увеличение тока короткого замыкания сопровождается возрастанием потоков рассеяния, а следовательно, и возрастанием насыщения стали. Последнее приводит к уменьшению проводимости пазового рассеяния, что в свою очередь ведет к еще большему возрастанию тока. В то же время произведение этих нелинейно изменяющихся величин при внезапном коротком замыкании в первые моменты времени остается величиной постоянной:

$$L_s \cdot i_k = \Psi_{sk} = \text{const.} \quad (5)$$

Условие постоянства потокосцепления позволяет сразу определить величину потока рассеяния обмотки статора, а следовательно, сразу же определить значение относительной магнитной проницаемости в любом сечении зубца.

При внезапном коротком замыкании обмотки статора в момент прохождения э. д. с. генератора через максимум (фазный угол э. д. с. равен $\frac{\pi}{2}$), потокосцепление обмотки статора равно нулю. При повороте ротора

на угол $\frac{\pi}{2}$ поток возбуждения стремится проникнуть в контур обмотки статора. Однако в силу закона электромагнитной инерции короткозамкнутый контур обмотки статора стремится сохранить свое потокосцепление постоянным. По обмотке статора протекает ток, создающий поток, равный потоку возбуждения, но противоположно направленный. Этот поток проходит по путям рассеяния обмотки статора, в основном по зубцовому слою. Учитывая разветвление потока по двум параллельным путям, получаем поток поперек пазов статора равным $\frac{\Phi_0}{2}$.

При внезапном коротком замыкании обмотки статора в момент прохождения э. д. с. обмотки через нуль (фазный угол э. д. с. $\gamma_0 = 0$), потокосцепление обмотки статора равно Ψ_0 . Ток внезапного короткого замыкания достигает максимума при повороте ротора на угол π . При этом поток возбуждения стремится проникнуть в контур обмотки статора

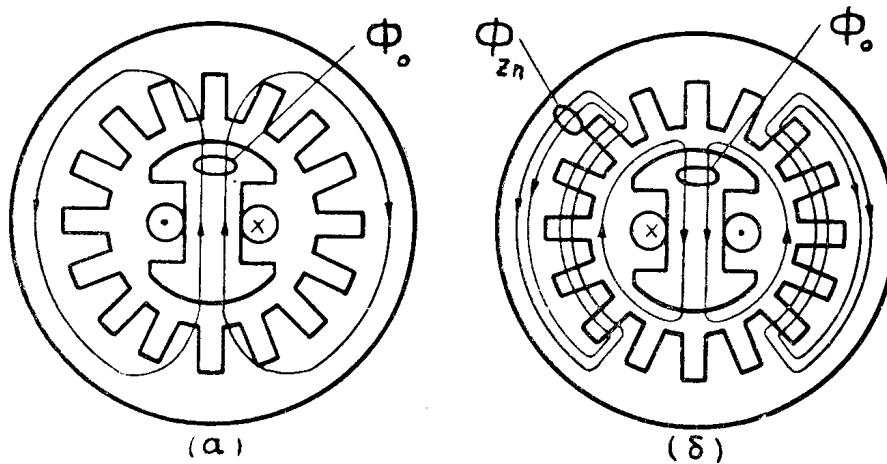


Рис. 1. Распределение потоков Φ_0 и Φ_{zn} при внезапном коротком замыкании в „0“ ЭДС при $\gamma_0 = 0$ (а), $\gamma_0 = \pi$ (б)

в противоположном начальном направлении. По обмотке статора протекает ток, создающий поток рассеяния, равный удвоенному значению потока возбуждения. Поток поперек пазов статора равен Φ_0 , рис. 1.

В общем случае при внезапном коротком замыкании в момент, когда фазный угол напряжения равен γ_0 , поток по зубцовому слою поперек пазов статора равен

$$\Phi_{sz} = \frac{\Phi_0 (1 + \cos \gamma_0)}{2}. \quad (6)$$

Учитывая вытеснение потока рассеяния в воздушный зазор машины коэффициентами κ_b , κ_l и затухание потока рассеяния коэффициентом κ_3 , получаем

$$\Phi_{sz} = \frac{\Phi_0 (1 + \cos \gamma_0)}{2} \cdot \kappa_b \cdot \kappa_3 \cdot \kappa_l \quad (7)$$

Коэффициент вытеснения потока в воздушный зазор машины зависит от величины потока машины геометрии зубцовой зоны и величины воздушного зазора. Для ударных генераторов величина κ_b лежит в пределах $0,9 \div 0,95$.

Коэффициент затухания потока рассеяния имеет тот же физический смысл, что и коэффициент затухания тока внезапного короткого замыкания. Для первого полупериода после момента короткого замыкания коэффициент затухания может быть принят равным $0,95 \div 0,98$ в зависимости от параметров и конструкции ударного генератора.

В случае, если обмотка статора ударного генератора замыкается на индуктивную нагрузку, влияние изменения режима на величину потока рассеяния можно учесть коэффициентом нагрузки κ_n . Тогда

$$\Phi_{sz} = \frac{\Phi_0}{2} (1 + \cos \gamma_0) \cdot \kappa_b \cdot \kappa_3 \cdot \kappa_n \cdot \kappa_l. \quad (8)$$

Зависимость коэффициента нагрузки от соотношения между параметрами нагрузки и генератора представлена на рис. 2. Для режима внезапного короткого замыкания $\kappa_n = 1$ при работе генератора на согласованную нагрузку $\kappa_n = 0,5$. Зная величину потока, протекающего по зубцовому слою статора, нетрудно определить индукцию в любом сечении по высоте зубца. Распределение индукции по высоте зуба статора показано на рис. 3.

Максимальная индукция по высоте зубца — индукция в области клина. Вычислив поток Φ_{sz} на единицу длины активной части машины, получим:

$$B_{кл} = 2\Phi_{sz} \frac{1}{h_n + h_k}. \quad (9)$$

Индукция в любом другом сечении зубца на высоте h_x равна:

$$B_x = B_{кл} \frac{h_x}{h_n - h_k}. \quad (10)$$

По кривой намагничивания для найденных значений индукции нетрудно определить относительную магнитную проницаемость железа в рассматриваемом сечении:

$$\mu_x = \frac{B_x}{\mu_0 H_x}. \quad (11)$$

Проводимость пазового рассеяния обмотки статора с учетом насыщения железа определяется как

$$\lambda_{пн} = \frac{h_k}{b_n + \frac{b_z}{\mu_k}} + \frac{1}{3} \sum_i \frac{h_i}{b_n + \frac{b_{zi}}{\mu_i}}, \quad (12)$$

где h_i — высота i -го участка зубца,
 b_{zi} — средняя ширина зубца на i -м участке,
 μ_i — среднее значение относительной магнитной проницаемости на i -м участке.

Паз статора целесообразно разбить по высоте на три—четыре участка.

В качестве примера приводим результаты расчета насыщенного значения индуктивного сопротивления пазового рассеяния обмотки

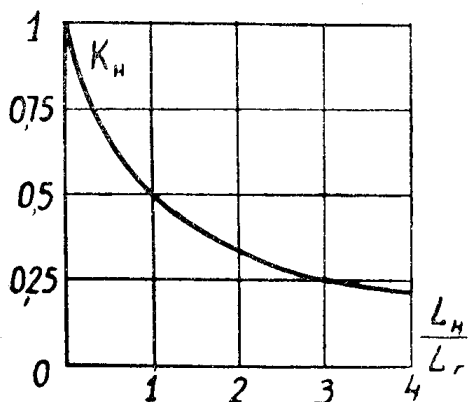


Рис. 2. Значения K_n от отношения $\frac{L_n}{L_r}$

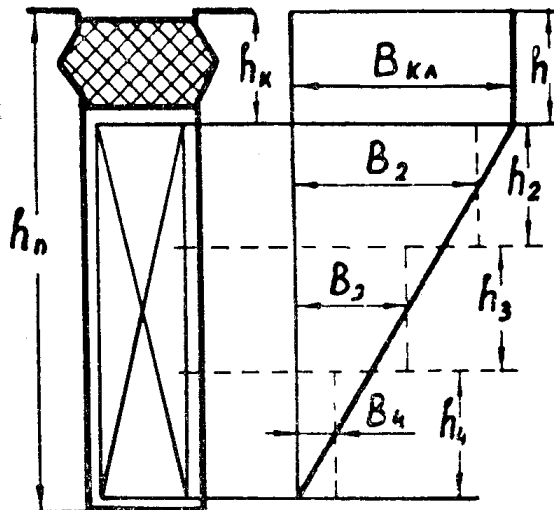


Рис. 3. Распределение индукции по высоте паза

статора ударного генератора ТИ-25-2 при внезапном коротком замыкании в моменты $\gamma_0 = \frac{\pi}{2}$ и $\gamma_0 = 0$, табл. 1.

Таблица 1

γ_0	Φ_{sz} (Вб/м)	№ участка	h_i (с м)	b_{zi} (см)	b_n (см)	μ_i (о. е.)	λ_i	$\lambda_{нн}$	$X_{нн}$ (ом)
$\frac{\pi}{2}$	0,410	1	2,60	4,50	3,2	1,42	0,408	0,94	0,0450
	0,410	2	2,46	4,94	3,2	1,52	0,127		
	0,410	3	2,46	5,35	3,2	2,3	0,148		
	0,410	4	2,46	5,80	3,2	1600	0,256		
0	0,762	1	2,60	4,50	3,2	1,19	0,373	0,84	0,040
	0,762	2	2,46	4,94	3,2	1,24	0,114		
	0,762	3	2,46	5,35	3,2	1,47	0,120		
	0,762	4	2,46	5,80	3,2	19,1	0,234		

Проводимость пазового рассеяния без учета насыщения $\lambda_n = 1,53$ соответственно $\chi_n = 0,0735$ ом.

Для сравнения приводим результаты расчета $\chi_{нн}$, χ_{sn} и χ_{dn} по трем методикам табл. 2.

В табл. 2 принято:

$\chi_{лэ}$ — индуктивное сопротивление рассеяния лобовой части обмотки статора с учетом демпфирующего действия немагнитных конусов;

$\chi_{кн}$ — индуктивное сопротивление рассеяния по коронкам зубцов с учетом влияния насыщения стали;

- $X_{дн}$ — индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния с учетом влияния насыщения стали;
- $X_{сн}$ — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения стали и демпфирования потоков рассеяния лобовых частей;

Таблица 2

γ_0	Методика расчета	$X_{лн}$ (ОМ)	$\frac{X_{лн}}{X_n}$	$X_{лэ}$ (ОМ)	$X_{кн}$ (ОМ)	$X_{дн}$ (ОМ)	$X_{сн}$ (ОМ)	$X_{дн}''$ (ОМ)	$\frac{X_{дн}''}{X_d''}$
$\frac{\pi}{2}$	[5]	0,043	0,585		0,012		0,129	0,157	0,58
	[6]	0,050	0,680	0,066	0,014	0,008	0,138	0,166	0,615
	предлагаемая	0,045	0,613		0,013		0,132	0,160	0,59
0	[5]	0,028	0,386		0,008		0,110	0,138	0,51
	[6]	0,043	0,590	0,066	0,012	0,008	0,130	0,158	0,59
	предлагаемая	0,040	0,55		0,011		0,126	0,154	0,57

$X_{дн}''$ — сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора с учетом влияния насыщения стали и демпфирования потоков рассеяния лобовых частей;

X_d'' — сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора без учета влияния насыщения стали и демпфирования потоков рассеяния лобовых частей.

Таким образом, предложенная методика учета влияния насыщения на проводимость пазового рассеяния не уступает существующим методикам в точности расчетов, но значительно более проста, так как не требует большого объема вычислений методом последовательных приближений.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Костенко. Электрические машины, спецкурс, ГЭИ, 1949.
2. L. A. Kilgore. «Effects of Saturation on Machine Reactances» El. Engineering. V. 54, № 5, 1935.
3. И. К. Федченко. Техника высоких напряжений. Изд. «Вища школа», Киев, 1969.
4. А. И. Воронцов, Г. М. Хуторецкий. Испытательные генераторы для аппаратных лабораторий, Труды ВНИИЭМ, т. 14, 1963.
5. И. М. Постников. Проектирование электрических машин, ГИТЛ УССР, Киев, 1960.
6. В. В. Титов, Г. М. Хуторецкий и др. Турбогенераторы, расчет и конструкция, «Энергия», 1967.
7. Р. Рихтер. Электрические машины, т. 1, ОНТИ, 1935. т. 2, ОНТИ, 1936.