

# ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗНАЧЕНИЯ ПЕРЕХОДНОГО ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

*Ларин А.М., Рогозин Г.Г.*

*Донецкий государственный технический университет*

*lam@elf.dgtu.donetsk.ua*

*The deduced transient reactance dependence of the relative aperiodical component content in the phase current at the sudden three-phase short-circuit across the terminals of the synchronous machine with a small air gap and the analysis of the reasons of this phenomenon are proposed as the subjects to be discussed.*

Широкое распространение современных средств вычислительной техники и наличие программных разработок различных математических моделей переходного процесса в электрических машинах переменного тока обуславливает повышение требований к методам расчетного и экспериментального определения параметров их эквивалентных схем замещения. При этом в соответствии со сложившейся практикой для описания переходных и установившихся процессов в большинстве случаев используются дифференциальные уравнения электрических цепей машины вместо более полного моделирования с помощью уравнений электромагнитного поля. Такой идеализированный подход обеспечивает необходимую точность расчетов только при достаточно точном определении параметров электрической машины. Для этой цели наиболее часто используют опыты внезапного трехфазного короткого замыкания (ВКЗ).

Процедура нахождения значений параметров синхронных машин (СМ) из опытов ВКЗ регламентирована рядом документов: рекомендациями международной электротехнической комиссии IEC 34-4, стандартом США IEEE 115 и ГОСТ 10169-77 "Машины электрические синхронные трехфазные. Методы испытаний" [1]. Однако найденные из опытов ВКЗ значения электромагнитных параметров имеют разброс даже при реализации обработки исходных данных с помощью ЭВМ. Вопросам точности экспериментального определения параметров из опытов ВКЗ посвящено достаточное количество работ [2-5]. При этом в [3,4] анализируются причины разброса значений параметров, находимых по стандартной методике и даются рекомендации по ее уточнению, а в [5] разрабатываются методики обработки данных опытов ВКЗ в условиях несоответствия их проведения требованиям стандартов. В качестве одной из причин разброса в [3] указывается влияние допущения о пренебрежении вращением аperiodической составляющей тока ВКЗ. Это допущение, по мнению автора, является причиной разброса значений параметров, найденных по токам трех фаз. Вопросы исследования закономерности распределения значений индуктивных сопротивлений, полученных при обработке осциллограмм токов отдельных фаз при внезапных коротких замыканиях из режима холостого хода, в литературе не рассматривались.

Между тем, в сложившейся практике наладочных организаций, методологических рекомендациях наиболее полной монографии по промышленным испытаниям электрических машин [2] и указанных выше стандартах при экспериментальном определении некоторых электромагнитных параметров не учитываются особенности конструктивного исполнения синхронных машин малой мощности. Известно, однако, что при примерно равных значениях индукции величина воздушного зазора у машин малой мощности в десятки раз меньше, чем у крупных промышленных генераторов. Эта особенность может проявиться в существенном влиянии рассеяния высших гармонических магнитного потока в воздушном зазоре на значения электромагнитных параметров СМ малой мощности [6]. Индуктивное сопротивление, которое учитывает падение напряжения в обмотке статора от указанного, так называемого, дифференциального рассеяния, в свою очередь, влияет на величину полного индуктивного сопротивления рассеяния, включающего в себя также пазовое и лобовое рассеяние обмотки статора.

Поскольку индуктивные сопротивления, отражающие поведение синхронной машины в начальный момент внезапного изменения режима, в основном, определяются проводимостью путей магнитных потоков рассеяния, то приведенные соотношения имеют прямое отношение и к определению переходных и сверхпереходных индуктивных сопротивлений из опыта внезапного трехфазного короткого замыкания, принятого в качестве основного способа для определения этих параметров.

В соответствии с общепринятой эквивалентной схемой замещения для сверхпереходного индуктивного сопротивления по оси d (рис.1) в системе относительных единиц имеем

$$= \frac{W_f - i_{0+}}{I_{0+}} > \frac{X_{ad} + X_{o/\Gamma=1} + S}{X_{niI}} \quad (6)$$

где,  $x_a$  - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;  $x_{ad}$  - индуктивное сопротивление взаимоиндукции между контурами машины по продольной оси магнитной симметрии ротора;  $x_d, x_{cid}$  - индуктивные сопротивления рассеяния обмотки возбуждения и  $i$ -того контура, эквивалентной или демпферную систему ротора.

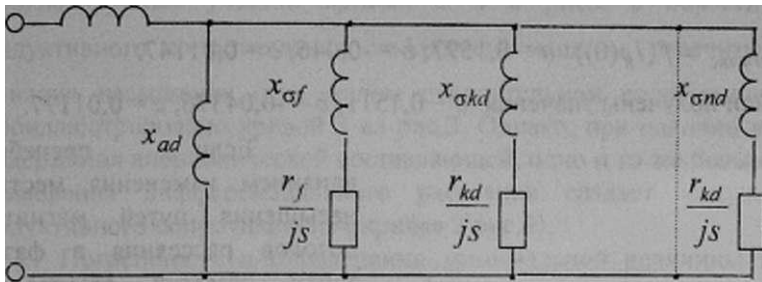


Рисунок 1 - Схема замещения СМ по продольной оси

сопротивление  $x_n$ , отражающее влияние дифференциального рассеяния, чувствительно к изменению состава высших гармонических магнитного потока в зазоре машины. Оно составляет обычно

значительную часть сопротивления  $x^{(j)}$ .

Индуктивные сопротивления синхронной машины по осям магнитной симметрии ротора в первый момент внезапного изменения режима снижаются до

значений  $x^{(n)}$  и  $x_q^{(f)}$  определяющих

периодические слагающие тока в обмотке статора в

координатных осях  $d$  и  $q$ . Особенностью переходных процессов, происходящих под воздействием возмущений со стороны обмотки статора, является возникновение свободных апериодических составляющих тока, обусловленных проявлением принципа сохранения неизменности магнитных потоков, сцепленных с каждой из фазных обмоток статора в начальный момент переходного процесса. Изменение изображающего вектора этих составляющих по экспоненциальному закону характеризуется в общем случае комплексным коэффициентом, действительная часть которого равна обратной величине постоянной времени  $t_0$  затухания модуля указанного вектора  $/7/$ . Появление практически

неподвижных в пространстве составляющих потокосцеплений, в свою очередь, вызывает изменение состава высших гармонических магнитного потока в воздушном зазоре машины. Наличие последних, в принципе, может обусловить асимметрию входных индуктивных сопротивлений фазных обмоток статора. Сопоставительный анализ экспериментальных осциллограмм короткого замыкания на выводах синхронной машины малой мощности и результатов расчета, указывает на то, что использование параметров, полученных экспериментально по методикам  $/1,2/$ , не позволяет с высокой степенью точности воспроизвести расчетным путем исходный переходный процесс в виде изменения мгновенных значений токов в фазных обмотках статора. Это ставит задачу углубленного исследования причин возникновения указанного явления.

Ниже рассматриваются результаты экспериментального исследования влияния величины апериодической составляющей тока короткого замыкания на значение переходного индуктивного сопротивления явнополюсной синхронной машины типа СГ-18,75 ( % - 18.57 кВА;  $U_M$  - 230 В;  $I_n$  = 47 А;  $n$  1000 об/мин. ). имеющей весьма малый межжелезный зазор под полюсами, равный 1,8 мм при диаметре расточки статора 405 мм.

Опыты, проводимые авторами статьи, повторялись многократно (от семи до девяти раз) для каждого из четырех заданных значений напряжения холостого хода на выводах синхронной машины. Напряжения выбирались таким образом, чтобы начальные значения периодической составляющей тока ВКЗ составляли примерно 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 отн.ед., Осциллограммы обрабатывались только для фаз, содержащих большую (более 75%) или малую (менее 25%) величину относительного содержания апериодической составляющей в фазном токе статора. Для измерения токов в фазных обмотках статора использовались безындукционные шунты и осциллографические гальванометры, имеющие собственную частоту колебаний 2500 Гц.

Расчет переходного индуктивного сопротивления по продольной оси ротора для варианта исполнения последнего без демпферной обмотки производился в соответствии с выражением  $/1/$ .

$$\ddot{u} - \omega - 3L$$

е)

где  $U(0)$  - линейное напряжение холостого хода, измеряемое непосредственно перед опытом, отн.ед.;

$I_{d(\infty)}, I_{dA}(0)$  - величины установившейся и переходной составляющих тока по кривой изменения

периодической составляющей тока якоря, отн.ед.

Средние, для полученных (по семи-девяти измерениям) в каждой из четырех серий испытаний,

минимальные ( $d_{\min}^{\wedge}$ ) и максимальные ( $d_{\max}^{\wedge}$ ) значения переходных индуктивных сопротивлений

приведены на рис.2 (кривые 1 и 2 соответственно). Первые из указанных значений соответствуют наименьшему содержанию апериодической составляющей в фазном токе, вторые наибольшему. На рис.2 в функции начального значения периодической составляющей тока статора показаны также аппроксимирующие кривые

$x_d = \frac{1}{\omega} \frac{dI}{dt} \approx \frac{I_{max}}{\omega} \sin(\omega t)$ . Аналитические выражения для них были получены путем

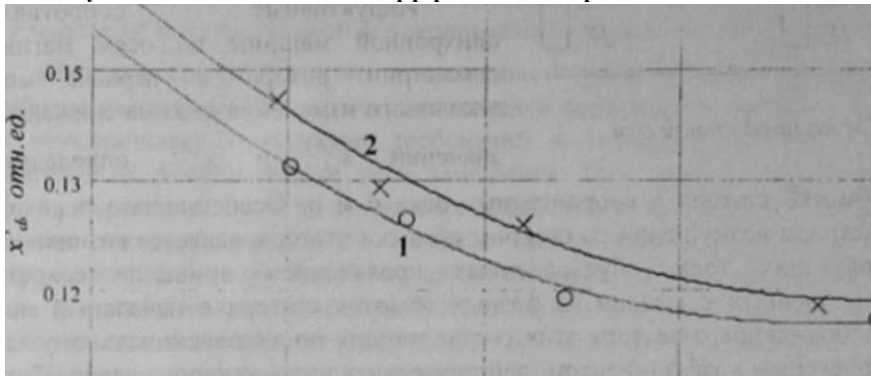
минимизации среднеквадратичных отклонений совокупности экспериментальных данных от закономерностей вида

$$a + b \cdot I(0) + c \cdot I(0)^2$$

Коэффициенты полинома для кривой  $x_{j4MC} = I(0)$ :  $a \sim 0,1597$ ;  $b = -0,046$ ;  $c = -0,01147$ .

$L \cdot \frac{dI}{dt} = U - R \cdot I$  соответственно были получены значения,  $a = 0,1511$ ;  $b = -0,04376$ ;  $c = 0,01177$ .

Если пренебречь влиянием изменения местного насыщения путей магнитных потоков рассеяния в фазных зонах обмотки статора, то сопоставление кривых 1 и 2 рис.2 указывает на зависимость дифференциального рассеяния от относительного содержания аperiodической составляющей



тока в начальный момент внезапного трехфазного короткого замыкания. При этом различие между значениями  $x'_{max}$  и  $x'_{min}$  (кривая 1, рис.3) уменьшается с ростом начального значения периодического тока якоря примерно по линейному закону. На рис.3 эти значения увеличены в 10 раз. Для исследованного диапазона изменения начального значения периодического переходного тока в пределах

от 0,5 до 2,0 отн. ед. разность между максимальным и минимальными значениями переходного

индуктивного сопротивления изменяется соответственно от 5,6 до 2,6 %.

Рисунок 2- Зависимости переходного индуктивного сопротивления генератора СГ-1Н, "5 от начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания

Принимая приближенно, что при возникновении в одной из фаз обмотки статора весьма малого значения аperiodической

составляющей тока величины аperiodических составляющих в двух других фазах имеют наибольшие значения. В соответствии с рекомендацией п. 17.1.3 ГОСТ 10169-77 получим следующее выражение для переходного индуктивного сопротивления

$$x'_{dcp} \sim (4 \cdot I_{min} + 2 \cdot I_{max}) \cdot I(0)$$

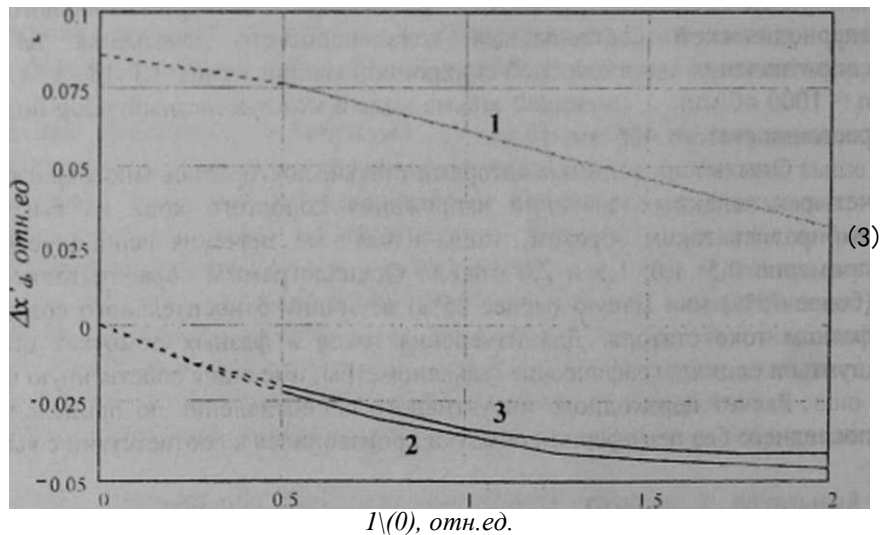


Рисунок 3 - Зависимости изменения переходного индуктивного сопротивления генератора СГ-18,75 от начального значения периодической составляющей тока КЗ

### Возможная погрешность определения минимального значения сопротивления при расчете $x'_{dcp}$ по (3)

при  $I_k(0) = 0,5$  отн.ед. составляет 3,85%, уменьшаясь с увеличением кратности начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания, что может быть объяснено влиянием насыщения путей магнитных потоков рассеяния на состав высших гармонических воздушного зазора. Если принять во внимание прогнозируемые участки кривых 1 и 2 рис.2 в области  $0 < I_k(0) < 0,5$ , то изменение переходного индуктивного сопротивления синхронной машины, рассчитываемое как  $L_{\min}(I_k(0)) - L_{\min}(0)$ , вследствие влияния насыщения (при малом относительном содержании апериодической составляющей) может быть проиллюстрировано кривой 3 на рис.3. Однако, при наличии в фазном токе статора большого относительного содержания апериодической составляющей, одно и то же повышение периодической составляющей тока за счет ослабления дифференциального рассеяния создает кажущееся дополнительное снижение переходного индуктивного сопротивления (кривая 2 рис.3).

Погрешность в определении минимальной величины переходного индуктивного сопротивления при возникновении в одной из фаз при внезапном коротком замыкании максимально возможного значения апериодической составляющей снижается, в рассматриваемом случае при  $I_k(0) = 0,5$  отн.ед. до 1,9%. Таким образом, среднее значение переходного индуктивного сопротивления для синхронных машин с малым воздушным зазором оказывается зависимым от начального момента внезапного трехфазного короткого замыкания, что вносит неопределенность в результаты испытаний по /1/.

Известные методы расчета индуктивного сопротивления рассеяния высших гармонических в воздушном зазоре /6/ позволяют определить этот параметр по величине сопротивления взаимоиндукции с учетом насыщения и коэффициенту рассеяния.

Теоретический анализ влияния пространственных гармонических м.д.с. на результаты измерения частотных характеристик в опыте питания неподвижной машины постоянным током, выполненный в /7/, показал возможность возникновения погрешностей при определении синхронных индуктивных сопротивлений вследствие изменения скольжения высших гармонических магнитного потока по отношению к ротору. Количественная оценка погрешностей при определении электромагнитных параметров по методу затухания постоянного тока, однако, затруднена в связи с различием в магнитных состояниях конструктивных элементов машины в статическом опыте и при измерениях, проводимых на вращающейся машине, питаемой током рабочей частоты. Интересно отметить, что распределение м.д.с. в воздушном зазоре машины в опыте затухания постоянного тока при неподвижном роторе аналогично распределению м.д.с. ст. апериодической составляющей тока при внезапном трехфазном коротком замыкании в двух случаях: при отсутствии апериодической составляющей в одной из фаз обмотки статора и при возникновении в одной из фаз максимально возможной апериодической составляющей. Первый случай подобен статическому опыту при питании двух, второй при питании трех фаз обмотки статора. Однако, вращение ротора с синхронной скоростью в опыте трехфазного короткого замыкания обуславливает наибольшее влияние высших гармонических магнитного потока на индуктивные сопротивления, измеряемые в области больших частот тока в роторе.

Оценим приближенно величину дифференциального рассеяния в соответствии с выражением

$$= [0,00215 + O_q \{q\}] x_{ad}, \quad (4)$$

где  $\sigma_0(<7)$  - коэффициент, учитывающий величину зубцового дифференциального рассеяния.

Для синхронного генератора СГ-18,75, имеющего  $\sigma_{\text{нечас}} = M^{15}$ ,  $\sigma_0 = 0,036$  и  $J = 3$ , в соответствии с (4) при  $a_0(c) = 0,0141$  /3/ получим  $\sigma = 0,0126$  отн.ед. Изменение дифференциального рассеяния вследствие влияния максимально возможного содержания апериодической составляющей при  $I_k(0) = 0,5$  отн.ед. составит 60%.

Полученные в работе результаты экспериментальных исследований указывают на целесообразность уточнения рекомендаций ГОСТ 10169-77 для определения переходных индуктивных сопротивлений СМ малой мощности из опытов ВКЗ.

Указанный стандарт распространяется на трехфазные генераторы, двигатели и компенсаторы мощностью от 1кВА и выше. Поэтому для явнополюсных синхронных машин малой мощности, имеющих сравнительно малую величину межжелезного зазора, определение периодической составляющей тока якоря в расчетном выражении (2) целесообразно производить не по среднему арифметическому значению периодических составляющих токов трех фаз, а по величине периодической составляющей тока той фазы якоря, которая имеет наименьшее значение асимметричной составляющей. Определяемая при этом минимальная величина переходного индуктивного сопротивления дает возможность правомерного

сопоставления ее со значениями переходных индуктивных сопротивлений, полученных различными экспериментальными и расчетно-конструкторскими методами.

Влияние аperiodической составляющей тока короткого замыкания на переходную функцию сопротивления синхронной машины

$$x_d(t) = Ca \tag{5}$$

$$\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{\sigma} \frac{1}{P} = \frac{1}{\sigma} \frac{1}{P} + \frac{1}{x_{ad}}$$

где  $x_{ad}$  - активные сопротивления обмотки возбуждения и  $i$ -го контура, эквивалентирующего массив или демпферную систему ротора, в последующие моменты времени после возникновения короткого замыкания быстро ослабляется даже при неизменной величине ее относительного содержания. Это объясняется большой скоростью затухания свободных токов в контурах ротора в начале переходного процесса. Следовательно,

индуктивное сопротивление  $x_d$  будет очень быстро увеличиваться от значения  $x_d(0) = x_d^{(n)}$  до величины синхронного индуктивного сопротивления  $x_d(\infty) = x_d$ . Можно также полагать, что влияние изменения состава высших гармонических магнитного потока воздушного зазора в процессе уменьшения аperiodической составляющей тока проявляется в снижении текущего значения постоянной времени  $\tau_a$ . Это предположение подтверждается при анализе экспериментальных данных.

В указанной связи для синхронных машин рассматриваемого конструктивного исполнения при определении совокупности электромагнитных параметров по данным опыта внезапного трехфазного короткого замыкания следует ожидать искажения частотных характеристик проводимости со стороны обмотки статора только в области больших значений частоты тока в контурах ротора. При этом погрешности должны возникать как при использовании опытной кривой фазного тока с большим относительным содержанием аperiodической составляющей, так и расчетной кривой модуля изображающего вектора периодической составляющей тока статора.

Для синхронных машин с большим междуфазным зазором и, в частности для турбогенераторов, рассмотренный параметрический эффект аperiodической составляющей тока при трехфазном коротком замыкании, вероятно, имеет незначительное значение. Таким образом, полученные результаты целесообразно учитывать при определении электромагнитных параметров синхронных машин с малым воздушным зазором, эксплуатируемых в автономных системах, а также при анализе результатов экспериментов, выполняемых с исследовательской целью на электродинамических моделях электрических систем.

#### Выводы

1. Экспериментально установлено увеличение переходного индуктивного сопротивления явнополюсной синхронной машины с малым воздушным зазором под полюсами ротора при большом относительном содержании аperiodической составляющей в фазном токе статора
2. Определение периодической составляющей тока якоря в расчетном выражении для определения минимальной величины переходного индуктивного сопротивления синхронной машины с малым воздушным зазором целесообразно производить по току фазы якоря, имеющей наименьшую аperiodическую составляющую.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 10169-77. Машины электрические синхронные трехфазные. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1977. 78 с.
2. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. М.: Энергия, 1968. - 574 с.
3. Харченко В.А. О разбросе значений параметров синхронных машин, находимых из опыта внезапного короткого замыкания // Изв. РАН. Энергетика. - 1996. - № 2. - С. 127-137.
4. Харченко В.А. Еще раз о разбросе значений параметров синхронных машин, находимых из опыта внезапного короткого замыкания // Изв. РАИ. Энергетика. - 1999. - № 1. - С. 142 - 151.
5. Глебов И.А., Харламова Е.Ф. Методика обработки опытных данных внезапного трехфазного короткого замыкания гидрогенератора // Изв. РАН. Энергетика. - 1999. - № 3. С. 153 - 157.
6. Шуйский В.И. Расчет электрических машин. - Л.: Энергия, 1968. - 732 с.
7. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - 624 с.