

УДК 621. 313.322

**А.М. ЛАРИН** (канд.техн.наук, доц.), **А.А. ШЕЙНА**  
**Донецкий национальный технический университет**  
**lam@elf.dgtu.donetsk.ua**

## **НОВЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ МАШИН ПО ДАННЫМ ОПЫТОВ ВНЕЗАПНОГО ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

*На основании аналитического описания изменения обобщенного вектора тока статора при трехфазном коротком замыкании на выводах синхронных машин предложен новый подход к экспериментальному определению частотных характеристик проводимостей со стороны обмотки статора, позволяющий уточнить стандартную методику, рекомендуемую ГОСТ 10169-77.*

**Введение.** Проведение опытов внезапного трехфазного короткого замыкания (ВКЗ) рекомендуется для экспериментального определения синхронного, переходного и сверхпереходного индуктивных сопротивлений по продольной оси ротора синхронных машин (СМ), а также соответствующих постоянных времени. Процедура нахождения значений указанных параметров регламентирована рядом документов: рекомендациями международной электротехнической комиссии IEC 34-4 [1], стандартом США IEEE 115 и действующим в Украине и странах СНГ отраслевым стандартом ГОСТ 10169-77 “Машины электрические синхронные трехфазные. Методы испытаний” [2].

Известно, что методы определения электромагнитных параметров электрических машин, основанные на измерениях токов и напряжений, регистрируемых при проведении эксперимента, имеют погрешности. Эти погрешности проявляются в виде разброса рассчитываемых параметров и затрудняют ответ на вопрос: свидетельствует ли это о некорректности теоретических допущений при разработке алгоритмов расчета, или о невозможности регистрации в опытах необходимых параметров режима с заданной точностью. Поэтому вопросам точности экспериментального определения параметров СМ из опытов ВКЗ посвящено большое количество работ [3-7].

В основу стандартной [1, 2] методики положена упрощенная модель, которая кроме обмотки возбуждения (ОВ) учитывает только по одному демпферному контуру по каждой из осей магнитной симметрии ротора СМ. Предполагается, что затухающая периодическая составляющая тока статора при внезапном трехфазном коротком замыкании имеет не более двух электромагнитных постоянных времени. Принимается также допущение о пренебрежении второй гармоникой в токе КЗ и неучете медленного вращения магнитного потока, созданного аperiodической составляющей тока статора. Теоретически наличие указанных составляющих в токе статора при ВКЗ было показано в [8].

Математическая модель, принятая в упомянутых стандартах [1, 2], представляет аналитическое выражение для фазных токов. Например, для фазы А обмотки статора при КЗ из режима холостого хода оно имеет вид:

$$i_A(t) = (I_{d\infty} + I_d' e^{-t/T_d'} + I_d'' e^{-t/T_d''}) \cos(\omega t + \gamma_0) - I_{am} \cos(\gamma_0) e^{-t/T_a}, \quad (1)$$

где  $I_{d\infty}$ ,  $I_d'$ ,  $I_d''$ ,  $I_{am}$  - установившаяся, начальные значения переходной, сверхпереходной и максимально возможной аperiodической составляющих фазного тока;  $T_d'$ ,  $T_d''$ ,  $T_a$  - постоянные времени затухания свободных токов;  $\gamma_0$  - угол между осью фазы А статора и осью  $d$  ротора в момент КЗ;  $\omega$  - частота вращения ротора.

Авторы работ [3-5] анализируя стандартную методику, констатируют разброс даже при автоматизированном определении электромагнитных параметров (ЭМП) с помощью ПЭВМ и пытаются установить его причины в принятии допущения, связанного с неучетом присутствующей в токе статора при ВКЗ составляющей второй гармоники. При этом они не исследуют влияния медленного вращения аperiodической составляющей.

В [6, 7] влияние указанных допущений на разброс ЭМП рассматривается одновременно. При этом используется концепция авторов работы [9]. В соответствие с этой концепцией этапы исследования заключаются в следующей последовательности определения ЭМП:

- выбор математической модели процесса ВКЗ;
- разработка алгоритма нахождения параметров;
- проведение идеализированного эксперимента, направленного на расчет изменения тока при ВКЗ по заданным ЭМП СМ и обратное их определение по результатам расчета переходного процесса;
- сопоставительный анализ исходных и полученных в результате идеализированного эксперимента ЭМП.

© Ларин А.М., Шейна А.А., 2011

Если отличие результатов определения ЭМП в идеализированном эксперименте удовлетворяет заданной точности, то это свидетельствует о правильности выбранной математической модели и, следовательно, о ее возможности применения к реальным электрическим машинам. В противном случае это будет свидетельствовать о несоответствии модели реальному объекту. Тогда необходимо уточнить модель и произвести новое определение измеряемых параметров.

Применяя подход, описанный в [9] автором [6, 7] в качестве причин разброса выявлено влияние допущений, связанных с пренебрежением медленным вращением аperiodической составляющей и одновременным неучетом второй гармоники тока ВКЗ, которые положены в основу стандартной методики [2].

Более строгая математическая модель, которую необходимо использовать для уточненного определения ЭМП, должна быть представлена следующим выражением:

$$i_A(t) = (I_{d\infty} + I_d' e^{-t/T_d'} + I_d'' e^{-t/T_d''}) \cos(\omega t + \gamma_0) - [I_{am} \cos(\omega_a t + \gamma_0) + I_{2m} \cos(2\omega t + \gamma_0)] e^{-t/T_a}, \quad (2)$$

где  $I_{2m}$  - начальное значение тока двойной частоты;  $\omega_a$  - частота вращения аperiodической составляющей потока обмотки статора.

Уравнение (2) получено путем решения уравнений Парка-Горева в операторной форме записи при неучете активных сопротивлений обмоток статора и ротора на амплитуды и фазы соответствующих составляющих токов. Активные сопротивления при таком подходе учитываются только в соответствующих коэффициентах затухания.

Однако, показав необходимость уточнения модели, автор не переходит к ней, а формулирует предложения по уточнению стандартной методики, направленные на контроль точности проведения экспериментов и некоторые изменения алгоритма определения параметров из условия максимального приближения к модели, принятой в стандартах. Таким образом, суть работ [6, 7] сводится к требованию проведения опытов ВКЗ и обработки исходных данных при таких условиях, при которых модель СМ, описываемая уравнением (1), максимально соответствует реальному объекту.

В частности, предлагается переходные и сверхпереходные индуктивные сопротивления и соответствующие постоянные времени изменения периодической составляющей тока определять отдельно по токам в каждой фазе, а затем находить их среднее значение. Постоянную времени, характеризующую изменение аperiodической составляющей, рекомендуется определять по току в „особой фазе”, т.е. в фазе, ось которой в момент замыкания совпадает с продольной осью ротора. В этом случае влияние медленного вращения аperiodического потока пренебрежимо мало. Для исключения влияния на определяемые ЭМП тока второй гармоники предлагается переходные параметры находить по результатам измерения периодического тока через время примерно равное  $4T_a$ , т.е. начиная с момента времени, когда аperiodическая составляющая уже затухла.

В указанных литературных источниках не оценивается влияние параметров СМ по поперечной оси на токи в фазах при ВКЗ. Как показано в [8], такое влияние всегда имеет место даже при КЗ из режима холостого хода. Это обусловлено влиянием активных сопротивлений роторных контуров. Кроме того, как уже указывалось, во всех рассматриваемых случаях предполагается, что СМ кроме обмотки возбуждения имеет только по одному демпферному контуру по каждой оси симметрии ротора. В настоящее время при решении задач расчета электромеханических переходных процессов имеет место тенденция к учету многоконтурности роторов. Действующий в Украине стандарт [2] предусматривает в п. 25 и п.26 определение электромагнитных параметров и частотных характеристик с учетом на роторе произвольного числа контуров.

Вопросы исследования математической модели, положенной в основу стандартной методики определения совокупности электромагнитных параметров СМ с учетом многоконтурности ротора по данным опытов ВКЗ в литературе не рассматривались.

**Целью настоящей работы** является повышение точности экспериментального определения частотных характеристик проводимости со стороны обмотки статора СМ по данным измерения параметров переходного режима при внезапном трехфазном коротком замыкании на выводах электрической машины.

**Материалы и результаты исследований.** Воспользуемся для анализа стандартной методики определения частотных характеристик (ЧХ) проводимости СМ со стороны обмотки статора  $y_d(js) = \frac{1}{x_d(js)}$

приведенной выше концепцией [9].

Выбор математической модели для определения электромагнитных параметров и ЧХ с учетом многоконтурности ротора дан в [2]. В соответствии с пунктом 25.1 ГОСТ –10169-77 параметры машины по продольной оси следует определять по переходной функции, представляющей изменение огибающей периодического тока якоря в опыте ВКЗ. Эта составляющая определяется как полуразность ординат верхней и нижней огибающих фазного тока. Представляя периодическую составляющую тока суммой экспонент, закон ее изменения во времени может быть описан функцией вида

$$i_{\text{пер}}(t) = I_{d\infty} + \sum_{k=1}^n I_d^k e^{-t/T_d^k}, \quad (3)$$

где  $I_{d\infty}$  - установившееся значение тока КЗ;  $I_d^k, T_d^k$  - начальное значение и постоянная времени затухания  $k$ -ой экспоненциальной составляющей периодического тока;  $n$  - количество экспонент, равное числу учитываемых контуров на роторе по продольной оси.

Таким образом, с учетом многоконтурности ротора закон изменения фазного тока статора при ВКЗ имеет вид, аналогичный (1), с той лишь разницей, что периодическая составляющая тока представляется не двумя, а тремя – четырьмя (по рекомендации [2]) экспонентами. В соответствии со стандартной методикой переходной функции (3) соответствуют следующие выражения для определения ЧХ проводимости со стороны обмотки статора по продольной оси ротора  $y_d(j\omega)$ :

$$y_d(j\omega) = \frac{1}{x_d(j\omega)} = I_{d\infty} + \sum_{k=1}^n I_d^k \frac{j\omega}{j\omega + \alpha_d^k} \quad (4)$$

или

$$y_d(j\omega) = \frac{1}{x_d} + \sum_{k=1}^n \frac{j\omega}{x_d^k j\omega + r_d^k}, \quad (5)$$

где  $\alpha_d^k$  - коэффициент затухания  $k$ -той экспоненциальной составляющей:  $\alpha_d^k = \frac{1}{\omega \cdot T_d^k}$ .

Параметры, входящие в (5), определяются в соответствии с п. 25.1.1 [2] следующим образом:

$$x_d = \frac{1}{I_{d\infty}}; \quad x_d^k = \frac{1}{I_d^k}; \quad r_d^k = \frac{x_d^k}{\omega \cdot T_d^k}. \quad (6)$$

Из (4) видно, что геометрическим местом точек комплексных проводимостей отдельных эквивалентных роторных контуров  $I_d^k \frac{j\omega}{j\omega + \alpha_d^k}$  являются окружности, диаметры которых определяются начальными значениями соответствующих экспоненциальных составляющих  $I_d^k$ , аппроксимирующих периодический ток статора. Тогда на основании частотной характеристики  $y_d(j\omega)$  можно дать графическую интерпретацию стандартной методики определения ЭМП из опытов ВКЗ. Соответствующие построения приведены на рис. 1.

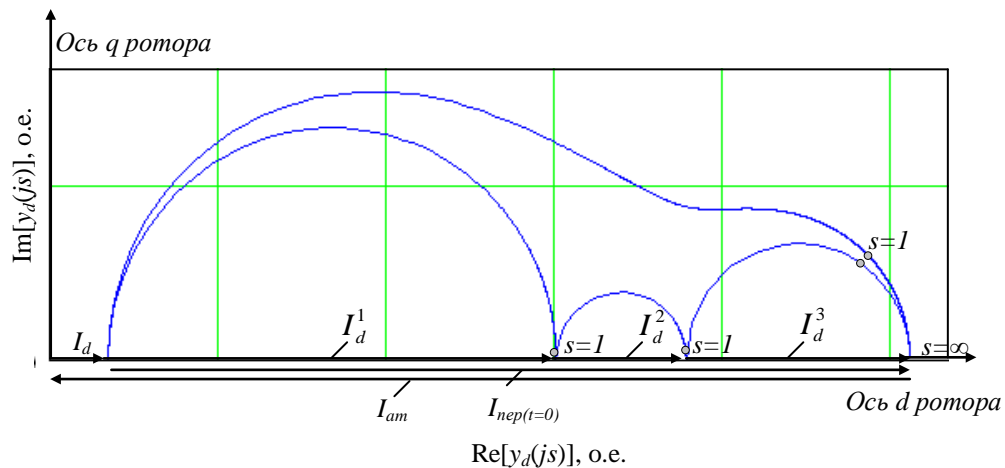


Рисунок 1 – Комплексные проводимости эквивалентных роторных контуров

Из анализа рис.1 следует, что стандартная методика предполагает определение сверхпереходного индуктивного сопротивления, как сопротивления машины со стороны обмотки статора при бесконечно большом скольжении ротора, т.е.  $x_d'' = x_d(j\omega)_{s=\infty} = \frac{1}{y_d(j\omega)_{s=\infty}}$ . Это соответствует тому, что начальное значение периодической составляющей тока КЗ определяет проводимость СМ при скольжении  $s = \infty$ . Следовательно,

$$y_d(j\omega)_{s=\infty} = I_{d\infty} + \sum_{k=1}^n I_d^k. \quad (7)$$

В настоящее время процедура измерения параметров режима в опытах ВКЗ, реализуется, как правило, с применением аналого-цифровых преобразователей (АЦП) или с помощью специализированных цифровых

регистраторов с последующей их обработкой на ПЭВМ. Однако, при этом используется, практически, такой же подход, как и при графических построениях результатов обмеров осциллограмм вручную, т.е. периодическая и аperiodическая составляющие находятся соответственно как полуразность и полусумма огибающих кривых фазных токов [6, 7]. Аппроксимация периодического тока осуществляется путем последовательного выделения вначале переходной (по заключительной стадии переходного процесса), а затем сверхпереходной (по начальной части переходной функции после вычитания уже найденной переходной) составляющих. Анализ параметров многоконтурных эквивалентных схем замещения ряда промышленных турбогенераторов, указывает на наличие роторных контуров, электромагнитные постоянные времени которых менее полупериода синхронной частоты. Даже если периодическую составляющую переходного тока определять в соответствии с требованиями стандарта (по среднему значению периодических токов трех фаз), выделение экспонент с постоянными времени, соизмеримыми с временем полупериода промышленной частоты, окажется невозможным. Это связано с тем, что, в этом случае, огибающая экспериментальной кривой может быть задана не менее, чем через 0,0033 с. Дискретизация тока каждой фазы увеличивается, при этом, в три раза и составляет пол периода промышленной частоты. Поэтому, необходимость представления переходного периодического тока тремя – четырьмя экспоненциальными составляющими для снижения погрешностей определения частотных характеристик в области больших значений скольжений в качестве исходной информации в опытах ВКЗ следует использовать изображающий вектор переходного тока статора. Частота дискретизации замеров фазных переходных токов с помощью цифровых регистраторов, в этом случае, может составлять 5 кГц и более.

**Идеализированный эксперимент.** В настоящей работе идеализированный эксперимент (ИЭ) – это расчет электромагнитного переходного процесса при внезапном трехфазном КЗ на выводах СМ с помощью математической модели, а не опыт на реальном генераторе. По своей сути такой ИЭ можно рассматривать как метрологическую поверку средств измерений и оценку принципиальной возможности использования стандартной методики для определения ЧХ СМ. Точность определения параметров, в этом случае, может быть оценена путем сопоставления исходных и найденных по результатам расчета характеристик. В идеализированном эксперименте эталонным сигналом является кривая изменения модульного значения изображающего вектора тока статора при ВКЗ из режима холостого хода, определяемого как  $\sqrt{I_d^2(t) + I_q^2(t)}$ , с помощью программы для ПЭВМ, реализующей алгоритм численного интегрирования полных дифференциальных уравнений Парка-Горева, записанных в координатных осях  $d, q$ , вращающихся вместе с ротором.

Исследования проводились для синхронных генераторов различных конструктивных исполнений, типов и мощностей.

Параметры синхронных машин в виде эквивалентных схем замещения общепринятого вида определялись путем синтеза по экспериментальным частотным характеристикам  $y_d(js)$ . Их значения для некоторых из исследуемых генераторов приведены в табл. На рис.2 показаны исходные ЧХ для генератора МТ-30 (кривая 1) и турбогенератора ТГВ-200М (кривая 2).

Таблица – Параметры схем замещения синхронных генераторов

Тип синхронного генератора	Параметры роторных контуров, о.е.				
	$\frac{x_{of}}{r_f}$	$\frac{x_{od1}}{r_{d1}}$	$\frac{x_{od2}}{r_{d2}}$	$\frac{x_{od3}}{r_{d3}}$	$\frac{x_{od4}}{r_{d4}}$
СГ-18.75: $x_d'' = 0,130$ $x_\sigma = 0,041$ ; $x_{ad} = 0,779$	$\frac{0,1014}{0,00092}$	—	—	—	—
МТ-30: $x_d'' = 0,098$ $x_\sigma = 0,053$ ; $x_{ad} = 1,400$	$\frac{0,1385}{0,00314}$	$\frac{0,2379}{0,0211}$	$\frac{0,0981}{0,07816}$	—	—
ТГВ-200М: $x_d'' = 0,213$ $x_\sigma = 0,213$ ; $x_{ad} = 1,703$	$\frac{0,1990}{0,00147}$	$\frac{0,5670}{0,00282}$	$\frac{0,8830}{0,0981}$	$\frac{0,0750}{0,0369}$	$\frac{0,0000}{0,0686000}$

Значения параметров экспоненциальных составляющих  $I_d^k, T_d^k$ , характеризующих изменение периодического тока статора, а также параметров аperiodического тока и тока двойной частоты, определялись путем аппроксимации зависимости изменения модульного значения изображающего вектора тока статора от времени функцией вида,

$$i(t) = (I_{d\infty} + \sum_{k=1}^n I_d^k \cdot e^{-t/T_d^k}) \cos(\omega t) - [I_{am} \cos(\omega_a t) + I_{2m} \cos(2\omega t)] e^{-t/T_a}, \quad (8)$$

т.е. учитывалось вращение апериодической составляющей потока и наличие тока двойной частоты, но пренебрегалось влиянием составляющих токов по поперечной оси.

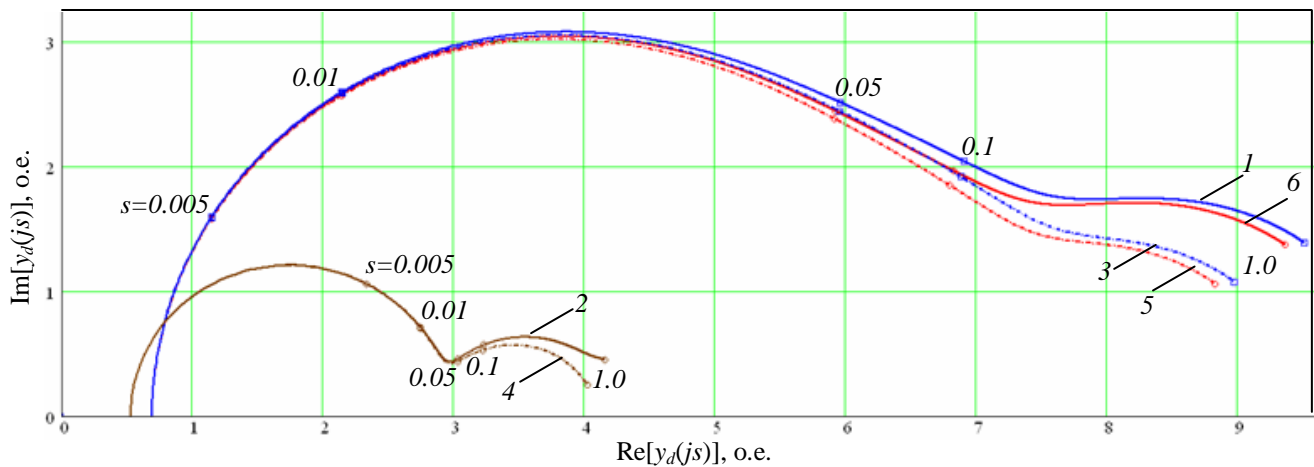


Рисунок 2 – Частотные характеристики синхронного генератора МТ-30 и турбогенератора ТГВ-200М

При этом решалась переопределенная задача оптимизационным методом, позволившим получить неизвестные параметры из условия минимума суммы квадратов отклонений наблюдаемых значений переходной функции  $Mod[I_{уз}(t_i)]$  от математического ожидания  $Mod[I_{расч}(t_i)]$ . Критерий качества можно записать в следующем виде:

$$J(\bar{\alpha}) = \sum_{i=1}^m \left( Mod[I_{расч}(\bar{\alpha}, t_i)] - Mod[I_{уз}(t_i)] \right)^2, \quad (9)$$

где  $i = 1, 2, \dots, m$  - количество исходных значений токов;  $I_{расч}(\bar{\alpha}, t)$  - расчетное значение по (8);  $I_{уз}(t)$  - опытное значение, полученное в результате идеализированного эксперимента;  $\bar{\alpha}$  - вектор синтезируемых параметров переходного тока:  $\omega_a, I_{am}, T_a, I_{2m}, I_d^k, T_d^k$ .

Расчет осуществлялся с использованием стандартной процедуры минимизации, в среде математического пакета MathCAD. Погрешность аппроксимации во всех рассматриваемых случаях не превысила 0.2%.

Исследования показали, что в соответствии со стандартной методикой расчет по (4) частотных характеристик проводимости со стороны обмотки статора во всех случаях приводит к систематической ошибке. Действительные составляющие и модульные значения комплексов токов рассчитанных проводимостей всегда оказываются меньше исходных.

В качестве примера на рис.3 приведены результаты аппроксимации переходной функции, изменения модуля обобщенного вектора тора статора при ВКЗ на выводах СГ типа МТ-30, имеющего демпферную систему и обладающего существенно различными динамическими свойствами по осям магнитной симметрии ротора ( $S_{ном} = 30$ кВА;  $U_{ном} = 414$ В;  $I_{ном} = 41,8$ А).

Величина начального значения периодического тока по результатам аппроксимации составила 8,82 о.е. С учетом установившегося тока  $I_{d\infty} = 0,688$  о.е. это соответствует значению сверхпереходного индуктивного сопротивления  $x_d'' = 0,105$ о.е., что на 7,1% больше исходного. Несовпадение действительных и мнимых частей проводимостей при  $s = 1$  составило 5,4% и 22,5% соответственно.

Для промышленного турбогенератора ТГВ-200М ( $S_{ном} = 235$ МВА;  $U_{ном} = 15,75$ В;  $I_{ном} = 8625$ А) погрешность в определении  $x_d''$  составила 13,1%. При этом несовпадение мнимых составляющих ЧХ при  $s=1$  увеличилось до 44,5%.

Анализ результатов позволил установить, что величина погрешностей тем больше, чем меньше значения постоянных времени экспоненциальных составляющих, аппроксимирующих периодический ток статора. Полученные в результате идеализированного эксперимента ЧХ для генераторов МТ-30 и ТГВ-200М приведены на рис.2 (кривые 3 и 4 соответственно).

Для явнополюсного синхронного генератора типа СГ-18,75, не имеющего демпферных обмоток ( $S_{\text{ном}} = 18,75 \text{ кВА}$ ;  $U_{\text{ном}} = 230 \text{ В}$ ;  $I_{\text{ном}} = 47 \text{ А}$ ), исходные и расчетные ЧХ практически совпали между собой.

Таким образом, можно утверждать, что принятый в [2] алгоритм определения ЧХ не соответствует математической модели синхронной машины в виде дифференциальных уравнений Парка-Горева. Следовательно, алгоритм экспериментального определения частотных характеристик необходимо уточнить.

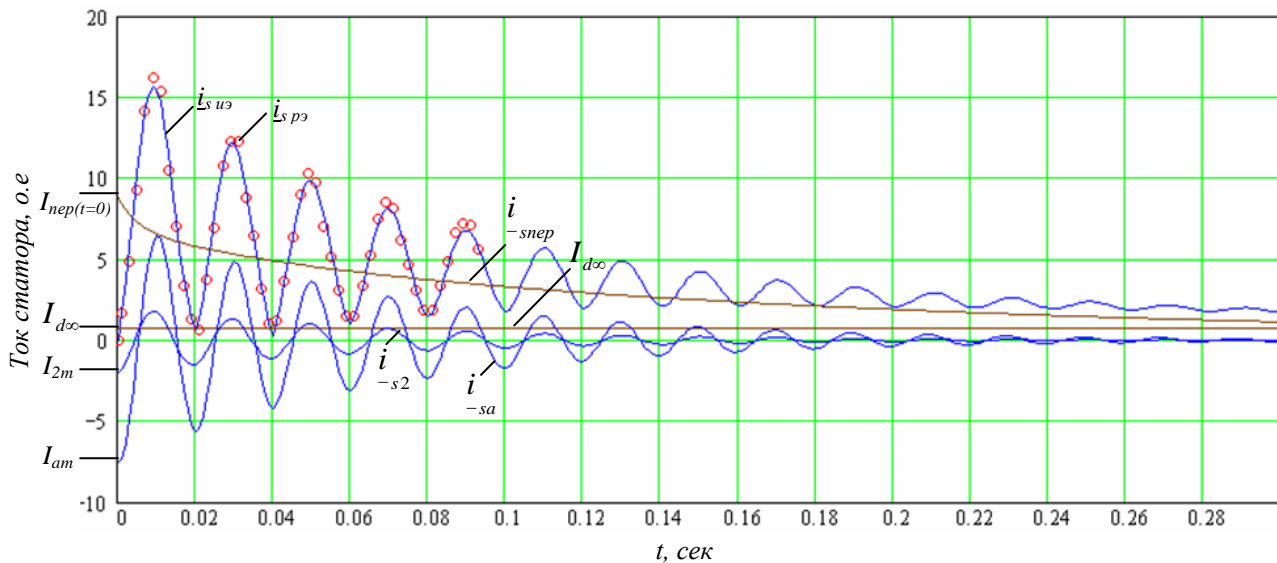


Рисунок 3 – Изменение изображающего тока обмотки статора СГ МТ-30 в  $d$ - $q$  координатах

**Уточненная математическая модель.** Воспользуемся математической моделью в виде аналитического соотношения, полученного в [10] на основе уточненных связей между частотными характеристиками и составляющими переходного тока. Это выражение представляет собою решение с погрешностью не более 1% полных уравнений Парка-Горева для ЭМ с незначительными значениями активного сопротивления обмотки статора. По нему можно определять изменение обобщенного вектора тока статора при трехфазных коротких замыканиях или включениях в сеть СМ, вращающейся с произвольной скоростью. Как известно, при КЗ в обмотках статора будут протекать: установившийся  $I_{d\infty}$ , аperiodический  $i_{-snp}$ , ток двойной частоты  $i_{-sa}$  и  $i_{-s2}$  и переходный периодический  $i_{-snp}$  токи. Применительно к расчету ВКЗ из режима холостого хода ( $\delta_0 = 0$ ) закон изменения изображающего вектора тока статора, полученный в [10] можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{i}_{-s}(t) = I_{d\infty} + \mathbf{i}_{-sa}(t) + \mathbf{i}_{-s2}(t) + \mathbf{i}_{-snp}(t). \quad (10)$$

В (10) векторы отдельных составляющих переходного тока статора определяются по частотным характеристикам  $y_d(js)$  и  $y_q(js)$  в соответствии со следующими соотношениями:

$$I_{d\infty} = y_d(js)_{s=0}; \quad (11)$$

$$\mathbf{i}_{-sa}(t) = -\frac{y_d(js)_{s=-1} + y_q(js)_{s=-1}}{2} \cdot e^{j\omega_a t} \cdot e^{-t/T_a}; \quad (12)$$

$$\mathbf{i}_{-s2}(t) = -\frac{y_d(js)_{s=-1} - y_q(js)_{s=-1}}{2} \cdot e^{-j2\omega t} \cdot e^{-t/T_a}; \quad (13)$$

$$\mathbf{i}_{-snp}(t) = \left( \sum_{k=1}^n I_d^k e^{-t/T_d^k} + j \sum_{l=1}^m I_q^l e^{-t/T_q^l} \right) \cdot e^{j\omega t}. \quad (14)$$

Составляющие переходного периодического тока статора  $I_d^k$  и  $I_q^l$ , входящие в (14), представляют собой проекции на оси  $d$  и  $q$  соответствующих векторов, рассчитываемых по параметрам  $(x, r)$  эквивалентных схем замещения с вынесенной ветвью намагничивания:

$$I_d^k = \operatorname{Re} \left[ \mathbf{i}_{-d}^k \right]; \quad I_q^l = \operatorname{Im} \left[ \mathbf{i}_{-q}^l \right]. \quad (15)$$

$$i_{-d}^k = \left( \frac{js}{r_d^k + jsx_d^k} \right)_{s=-1}; \quad i_{-q}^l = \left( \frac{js}{r_q^l + jsx_q^l} \right)_{s=-1}. \quad (16)$$

Графические построения для определения начальных значений составляющих обобщенного вектора тока статора при ВКЗ на выводах генератора типа МТ-30 показаны на рис.4.

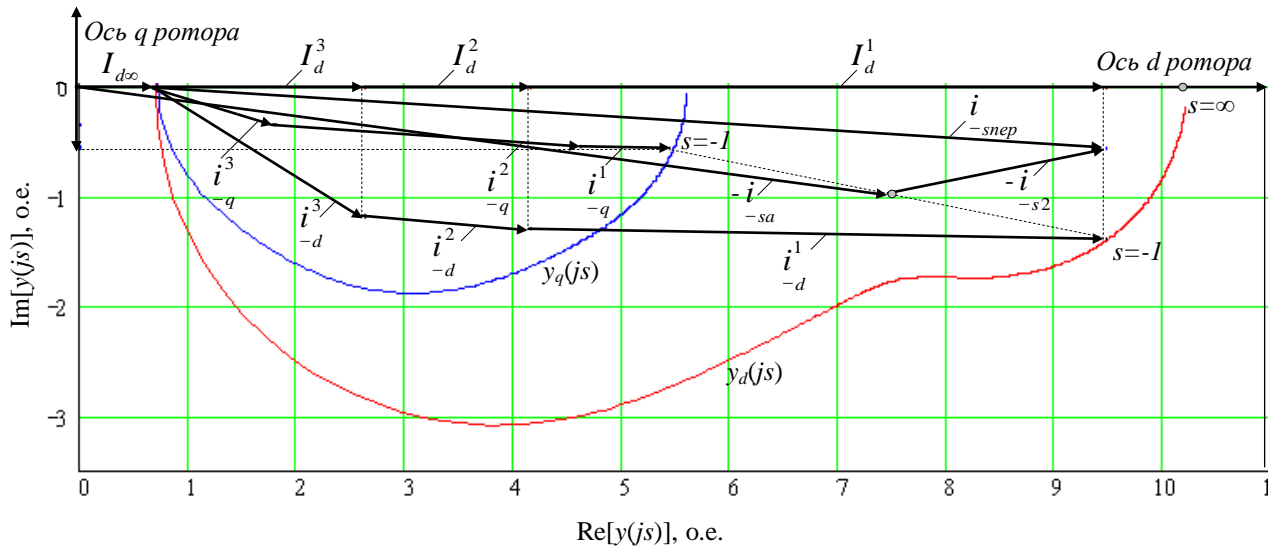


Рисунок 4 – Определение составляющих переходного тока статора при ВКЗ на выводах МТ-30

Как следует из рис.4 модульное значение полного периодического тока  $i_{-sneп}^n$  (соответствует  $s=-1$ ), используемое в стандартной методике для определения сверхпереходного сопротивления  $X_d''$ , меньше значения проводимости СГ по продольной оси при  $s=\infty$ , определяющей действительное значение последнего. Этим и объясняется несоответствие алгоритма определения ЭМП по [2] точной математической модели СМ.

Поэтому при расчете ЧХ начальные значения составляющих  $I_{dan}^k$ , полученные непосредственно в результате аппроксимации периодического тока и соответствующие  $s=1$ , необходимо пересчитывать к скольжению  $s=\infty$ .

**Уточненный алгоритм.** Можно предложить следующий алгоритм, уточняющий определение ЧХ.

По данным аппроксимации модуля обобщенного вектора тока статора функцией (8) начальные значения и коэффициенты затухания экспоненциальных составляющих периодического тока  $I_{dan}^k$ ,  $\alpha_{dan}^k$ , которые представляют собою проекции векторов комплексных проводимостей соответствующих роторных контуров при  $s=-1$  на продольную ось ротора.

Предполагая, что значения  $I_{dan}^k$  соответствуют скольжению  $s=\infty$ , находятся векторы комплексных проводимостей при  $s=-1$ :

$$y_{dan}^k(js)_{s=-1} = I_{dan}^k \frac{-j}{\alpha_{dan}^k - j}; \quad \varphi_d^k = \arg(y_{dan}^k(-j1))$$

Учитывая, что постоянные времени, найденные по исходным векторам или их проекциям на продольную ось остаются неизменными, рассчитываются истинные значения комплексных проводимостей роторных контуров  $i_{-d}^k$  при скольжении  $s=-1$ ):

$$i_{-d}^k = \frac{I_{dan}^k}{\cos(\varphi_d^k)} e^{j\varphi_d^k}.$$

Находятся действительные максимальные значения проводимостей роторных контуров при  $s=\infty$ , являющихся диаметрами окружностей соответствующих частотных характеристик:

$$I_{ducn}^k = \frac{Mod^2[i_{-d}^k]}{Re[i_{-d}^k]}.$$

По (4) рассчитывается ЧХ проводимости со стороны обмотки статора СМ.

Частотные характеристики для генераторов МТ-30 и ТГВ-200М, рассчитанные с использованием уточненного алгоритма в идеализированном эксперименте практически совпали с исходными (см. рис.2).

**Реальный эксперимент.** Экспериментальная проверка достоверности разработанного способа осуществлялась для модельного синхронного генератора типа МТ-30. Переходная функция изменения модуля обобщенного вектора тока статора (см. рис.3, кривая  $i_{s\text{ps}}$ ) рассчитывалась по данным регистрации трех фазных токов с дискретностью 0,002 с по известному соотношению:

$$I_s(t) = \sqrt{\frac{2}{3} [i_A^2(t) + i_B^2(t) + i_C^2(t)]}. \quad (17)$$

Погрешность аппроксимации функцией (8) экспериментальных значений не превысила 10%.

Частотные характеристики рассчитывались по стандартной и уточненной методике. Результаты приведены на рис.2. Отличие ЧХ, полученных с использованием стандартного подхода (рис.2, кривая 5) и уточненного (кривая 6) находятся в тех же пределах, что и результаты идеализированного эксперимента.

Таким образом, применение нового подхода позволяет снизить погрешность при определении частотных характеристик за счет исключения систематической ошибки, присущей стандартной методике.

**Выводы.** На основании аналитического описания изменения обобщенного вектора тока статора при трехфазном коротком замыкании на выводах синхронных машин предложен новый подход к экспериментальному определению частотных характеристик проводимостей со стороны обмотки статора, позволяющий уточнить стандартную методику, рекомендуемую ГОСТ 10169-77.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. International Electrotechnical Commission (IEC) Standard. Rotating Electrical Machines. Part 4: Methods for determining synchronous machines quantities from tests. Publication 34-4. Geneva, 1985. – 175 p.
2. Машины электрические синхронные трехфазные. Методы испытаний: ГОСТ 10169-77. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 78 с.
3. Kamwa I. Phenomenological models of large synchronous machine from short-circuit test during comissioning - A clasical / modern approach / I. Kamwa, P. Viarouge, R. Machfoudi // IEEE Tranc. on Energy Conversion, 1994, V.9, № 1 – P. 85-97.
4. Kamwa I. Computer software to automatic graphical analysis of sudden - short - circuit oscillograms of large synchronous machines / I. Kamwa, P. Viarouge, M. Pilote, et al. // IEEE Tranc. on Energy Conversion, 1995, V.10, № 3. – P. 399-406.
5. Kamwa I. Experience with computer -aided graphical analysis of sudden - short - circuit oscillograms of large synchronous machines. / I. Kamwa, P. Viarouge // IEEE Tranc. on Energy Conversion, 1995, V.10, № 3. – P. 407-414.
6. Харченко В.А. О разбросе значений параметров синхронных машин, находимых из опыта внезапного короткого замыкания / В.А. Харченко // Изв. РАН. Энергетика. – 1996. - № 2. – С. 127-137.
7. Харченко В.А. Еще раз о разбросе значений параметров синхронных машин, находимых из опыта внезапного короткого замыкания / В.А. Харченко // Изв. РАН. Энергетика. – 1999. - № 1. – С. 142-151.
8. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е.Я. Казовский. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 624 с.
9. Грановский В.А. Автоматизация измерений и вопросы методологии измерений / В.А. Грановский, С.Г. Рабинович / В.А. Грановский // Методы и средства автоматизации научного эксперимента. – М.: ЦНИИТТЭИ приборостроения, 1972.
10. Ларин А.М. Уточнение математической модели синхронной машины для определения совокупности электромагнитных параметров из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания / А.М. Ларин, А.А. Ткаченко // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2005. - №1. – С. 49-53.

Надійшла до редколегії 17.11.2010

Рецензент: Г.Г.Рогозін

А.М. ЛАРИН, Г.О. ШЕІНА  
Донецький національний технічний університет

A. LARIN, A. SHEINA  
Donetsk National Technical University

**Новий підхід до визначення частотних характеристик синхронних машин за даними дослідів раптового трифазного короткого замикання.** На основі аналітичного опису змінення узагальненого вектора струму статора при трифазном коротком замиканні на виводах синхронних машин запропоновано новий підхід до експериментального визначення частотних характеристик провідностей з боку обмотки статора, який дозволяє уточнити стандартну методику, що пропонується ГОСТ10169-77.

**A New Approach to the Determination of Frequency-Response Characteristics of Synchronous Machines from the Experiments on Sudden Three-Phase Short Circuits.** A new approach to experimental estimation of frequency-response characteristics of the synchronous machine, which allows improving the standard method recommended by State Standard 10169-77 is proposed, according to the analytical description of changing of a describing vector of a stator current at three-phase short circuits on the terms of synchronous machines.