

УДК 621. 313.322

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ОТ НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

*Шейна А.А., асс., Ларин А.М., к.т.н., доц., Ларина И.И., к.т.н., доц.  
Донецкий национальный технический университет  
83000, г. Донецк, ул. Артема, 58  
E-mail: lam@elf.dgtu.donetsk.ua*

Запропоновано метод синтезу еквівалентної схеми заміщення по поздовжній осі ротора синхронної машини, що відбиває вплив витиснення струму в обмотках і насичення магнітних ланцюгів. Отримано уточнені залежності параметрів схеми заміщення турбогенератора типу ТВВ-160 від початкового значення струму короткого замикання.

**Ключові слова:** турбогенератор, схема заміщення, насичення, коротке замикання.

A synthesis method of equivalent circuit on the direct rotor axis of synchronous machine, which reflected the influence of the current ousting in the windings and saturation of magnetic circuits is offered. The elaborated dependences of the equivalent circuit parameters from initial value of the short-circuit current are got for the TVV-160 type turbogenerator.

**Key words:** turbogenerator, equivalent circuit, saturation, short circuit current.

**Введение.** Повышение точности исследования переходных процессов в высокоиспользованных турбогенераторах может быть достигнуто только в том случае, если их математические модели будут отражать реальные электромагнитные связи с достаточной полнотой и, в частности, учитывать сложные явления магнитного насыщения, а также вытеснения тока в обмотках и массивных конструктивных элементах ротора. Для исследования переходных режимов работы турбогенераторов по дифференциальным уравнениям, в этом случае, важно установить характер зависимостей параметров электрической машины от насыщения магнитных цепей по путям основного магнитного потока и путям потоков рассеяния. При строгом подходе эту задачу можно решить с использованием теории электромагнитного поля. Трудность расчетного определения параметров [1] связана с наличием в магнитопроводе массивных элементов, наличием контактов по торцам ротора, а также присутствием материалов, имеющих сложные формы поверхностей и обладающих различными электротехническими свойствами, зависящими от электромагнитного поля. В этой связи является актуальной задача экспериментального определения совокупности электромагнитных параметров турбогенераторов в форме частотных характеристик или эквивалентных схем замещения, отражающих влияние насыщения.

**Анализ предыдущих исследований.** Известен ряд методов экспериментального определения электромагнитных параметров и учета влияния насыщения на координаты установившихся и переходных режимов электрических машин. Учет влияния насыщения магнитных цепей по путям потоков рассеяния обмотки статора может быть выполнен, в пер-

вом приближении, путем отнесения переменной составляющей зависимости  $x_d'' = f(I)$ , определяемой в опытах внезапного трехфазного короткого замыкания из режима холостого хода синхронной машины (СМ), к индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора  $x_{\sigma} = f(I)$  [2, 3]. Отразить влияние насыщения только по основному пути магнитного потока по продольной оси позволяют методы, основанные на определении совокупности электромагнитных параметров в статических режимах [1, 4]. Это позволяет уточнять расчеты переходных процессов в цепях обмоток статора. Уточненное решение задачи токораспределения в отдельных контурах синхронной машины обуславливает необходимость определения зависимостей индуктивных сопротивлений рассеяния в функции токов, протекающих в соответствующих контурах машины. Для этого в [5] разработана методика определения частотных характеристик (ЧХ) и параметров эквивалентных схем замещения в функции протекающих в соответствующих контурах токов. Однако, практический учет таких зависимостей в математических моделях электрических машин затруднителен вследствие того, что параметры схем замещения зависят от искомого тока. В [6] изложены основные положения метода идентификации параметров турбогенераторов, основанного на экспериментальных данных, определяемых из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания (ТКЗ). При этом получены зависимости параметров только эквивалентного демпферного контура в функции начального значения периодического тока в обмотке статора для турбогенераторов серии ТВВ.

Соответствие синтезированных эквивалентных

схем замещения турбогенератора исходным значением периодической составляющей тока короткого замыкания, при этом, проверялось косвенно в частотной области путем сопоставления экспериментальных частотных характеристик, проводимостей со стороны обмотки статора, полученных при различных исходных значениях напряжения, и рассчитанных по полученным зависимостям.

Данную работу следует рассматривать как дальнейшее развитие метода, предложенного в [6].

**Цель работы** – уточнение зависимостей всех параметров эквивалентной схемы замещения турбогенератора от начального тока статора при одновременном более точном выделении контура обмотки возбуждения генератора (ОВГ), а также оценка эффективности их использования для учета влияния насыщения при моделировании во временной области анализируемых параметров.

**Материалы и результаты исследований.** В работе рассматривается схема замещения СМ уточненной структуры, приведенная на рис. 1. Она более достоверна с физической точки зрения, поскольку в ней учитывается различие взаимной индуктивной магнитной связи между обмотками статора, возбуждения и эквивалентным контуром демпферной системы ротора.

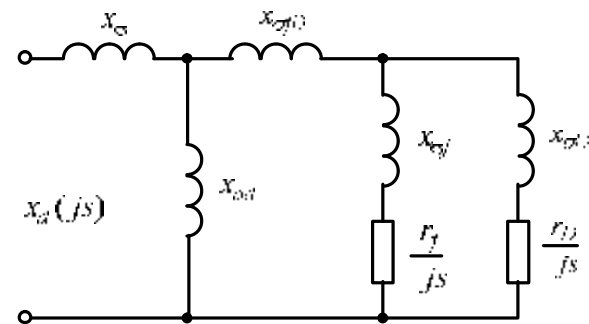


Рисунок 1 – Схема замещения турбогенератора ТВВ-160

Синтез эквивалентной схемы замещения турбогенератора при решении поставленной задачи основан на тех же допущениях, которые использовались в [6].

В [6] синтез параметров схемы замещения эквивалентных контуров ротора турбогенератора типа ТВВ-160 производится путем последовательного выполнения следующих расчетных процедур.

1. По параметрам экспонент, полученных в опытах короткого замыкания при различных значениях ЭДС холостого хода, рассчитываются частотные характеристики проводимости со стороны обмотки статора  $y_d(j\omega) = \frac{1}{x_d(j\omega)}$ .

2. Предполагая известными параметры  $x_\sigma(I)$  и  $x_{ad}$ , определяются частотные эквивалентные проводимости контуров ротора относительно зажимов ветви намагничивания  $Y_D^*(j\omega)$ :

$$Y_D^*(j\omega) = \frac{1}{\frac{1}{y_d(j\omega)} - x_\sigma} - \frac{1}{x_{ad}}. \quad (1)$$

В (1) принята следующая зависимость индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора от величины тока ней [3]:

$$x_\sigma(I) = 0,2 - 0,04(1 - \exp(-0,355I)). \quad (2)$$

3. Задаваясь значением  $x_{\sigma fD} = 0,011$ , определяются частотные характеристики проводимостей ОВГ и эквивалентного демпферного контура:

$$Y_f(j\omega) + Y_D(j\omega) = \frac{1}{\frac{1}{Y_D^*(j\omega)} - x_{\sigma fd}}. \quad (3)$$

4. Осуществляется синтез двухконтурной схемы замещения ротора синхронной машины для частотной характеристики, соответствующей ненасыщенному состоянию магнитных цепей генератора (при  $U_j = U_{min}$ ). Принимается, что контур, имеющий наибольшую постоянную времени, отражает влияние обмотки возбуждения.

5. Полагая, что индуктивное  $x_{\sigma f} = 0,145$  Ом и активное  $r_f = 0,00146$  Ом сопротивления ОВГ, не зависят от тока в обмотке статора, определяются параметры эквивалентного демпферного контура ( $r_D$  и  $x_{\sigma d}$ ) из частотных характеристик для других уровней насыщения.

Анализ полученных результатов позволил получить аналитические выражения для определения зависимостей  $r_D$  и  $x_{\sigma d}$  в функции тока статора:

$$r_D = 0,0218 - 0,0035(I_d - 1), \quad (4)$$

$$x_{\sigma d} = 0,1 \exp(-0,75[I_d - 1]). \quad (5)$$

Как следует из выполненного анализа, в [6] не осуществлялась структурная детализация схемы замещения ротора путем точного выделения контура обмотки возбуждения.

Для более точного выделения в принятой для исследования схеме замещения обмотки возбуждения необходимо при проведении опытов ТКЗ одновременно с измерением токов статора дополнительно регистрировать изменение тока в обмотке возбуждения. Определение собственно активного и индуктивного сопротивлений рассеяния контура ОВГ должно выполняться в соответствии с методикой, предложенной в [7]. В этом случае параметры синтезируемой схемы замещения должны одновременно адекватно отражать как исходную частотную характеристику проводимости со стороны обмотки статора  $y_d(j\omega)$ , так и частотную характеристику коэффициента распределения тока статора в ветви ОВГ  $C_f(j\omega)$ .

Для принятой схемы замещения последняя определяется в соответствии со следующим выражением:

$$C_f(j\omega) = C_{f1}(j\omega) \cdot C_{f2}(j\omega), \quad (6)$$

где  $C_{f1}(js) = \frac{Y_f(js)}{Y_f(js) + Y_D(js)}$ ; (7)

$C_{f2}(js) = \frac{Y_D^*(js)}{Y_D^*(js) + \frac{1}{x_{ad}}}$ . (8)

На рис. 2 приведены частотные характеристики  $C_f(js)$  для турбогенератора типа ТВВ-160, рассчитанные в соответствии с (6) – (8) по параметрам эквивалентных схем замещения, полученным в [6] для различных исходных напряжений в опытах трехфазного КЗ (кривые 4-6). Там же показаны соответствующие экспериментальные зависимости (кривые 1-3), определенные по данным аппроксимации токов в обмотках статора и возбуждения по соотношению, предложенному в [7]:

$C_f(js) = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{js \cdot i_{fan k}}{\alpha_{fan k} + js}}{y_d(js)}$ , (9)

где  $i_{fan k}$ ,  $\alpha_{fan k}$  – начальное значение и коэффициент затухания  $k$ -той экспоненциальной составляющей аperiodического тока в обмотке возбуждения;  $N$  – число экспоненциальных составляющих.

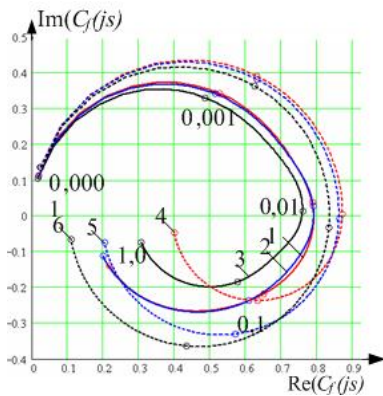


Рисунок 2 – Частотные характеристики  $C_f(js)$  турбогенератора ТВВ-160

При этом в опыте при напряжении  $0,26U_{ном}$  переходная функция аperiodического тока  $i_{faa}(t)$  представлялась двумя экспонентами, а в остальных – тремя.

Как следует из анализа характеристик рис. 2, расчетные и экспериментальные зависимости  $C_f(js)$  в различной степени отличаются для отдельных диапазонов скольжения. Наименьшие отличия для действительных и мнимых составляющих имеют место для характеристики, полученной при напряжении  $0,26U_{ном}$  (кривые 1 и 4). В области скольжения ротора от 0 до 0,1 о.е. максимальная погрешность не превышает 22,2%. Для ЧХ, соответствующих напряжениям  $0,47U_{ном}$  (кривые 2, 5), и  $0,7U_{ном}$  (кривые 3, 6) отличие экспериментальных и расчетных зависимостей в указанном диапазоне скольжений увеличивается до 47,6%. В области

скольжений более 0,1 о.е. для всех характеристик имеет место значительная погрешность, которая достигает 66%. Это указывает на то, что при расчете токов в обмотке возбуждения в переходных режимах будет иметь место большая погрешность, особенно в начале переходного процесса.

В качестве примера на рис. 3 показаны зависимости изменения тока в обмотке возбуждения при КЗ на выводах генератора из режима холостого хода с напряжением  $0,26U_{ном}$ . Сопоставление расчетной зависимости, полученной по данным [6] (кривая 2) с экспериментальной переходной функцией (кривая 1) свидетельствует, как и следовало ожидать, об их существенном отличии. Погрешность в определении максимального тока в этом случае достигает 30,0%. Анализ результатов, соответствующих другим уровням напряжения ( $0,47U_{ном}$  и  $0,7U_{ном}$ ), также свидетельствует о существенной погрешности в определении тока в ОВГ.

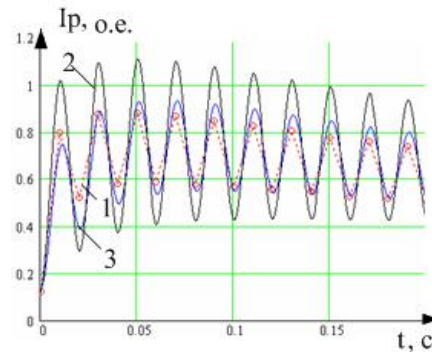


Рисунок 3 – Ток ротора турбогенератора ТВВ-160 для  $0,26U_{ном}$ : 1, 2, 3 – ток в обмотке возбуждения

Расчет переходных процессов в обмотке статора свидетельствует о наличии существенно меньшей погрешности. В качестве примера на рис. 4 приведена начальная часть осциллограммы токов в обмотке статора при коротком замыкании с напряжением  $0,26U_{ном}$ . Как следует из рис. 4 отличия расчетного тока в фазе А (кривая 2) от экспериментальных значений (кривая 1) не превышают 5,0% во всем наблюдаемом интервале времени. Аналогичные результаты имеют место и при расчете тока статора для других значений напряжения.

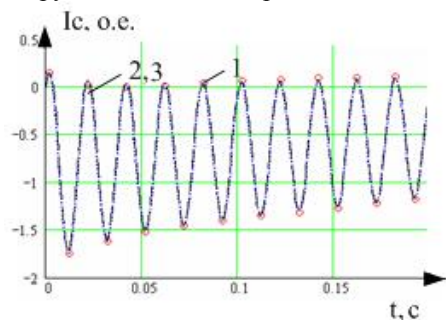


Рисунок 3 – Ток ротора турбогенератора ТВВ-160 для  $0,26U_{ном}$

Для уточнення залежностей параметрів еквівалентної схеми заміщення від початкового значення струму статора було здійснено виділення власної обмотки возбуждення по методикі [7] з використанням експериментальних залежностей  $C_f(j_s)$ , розраховуваних за співвідношенням (9).

Для забезпечення умов адекватності схеми заміщення як вхідної провідності з боку обмотки статора  $y_d(j_s)$ , так і частотної характеристики комплексного коефіцієнта розподілу струму статора в гілках обмотки возбуждення, виникла необхідність у виборі всіх параметрів схеми заміщення. При цьому змінювалися також опір розсіяння обмотки статора  $x_\sigma$  і індуктивне опір взаємодії між обмоткою возбуждення і еквівалентним демпферним контуром  $x_{\sigma D}$ . Параметри схеми заміщення (рис. 1), що відповідають різним рівням насичення наведені в таблиці.

**Таблиця 1 – Параметри схеми заміщення ТГ типу ТВВ-160 при різних початкових струмах статора**

Параметр	Початкове значення струму КЗ, о.е.		
	1,0000	2,1500	3,5400
$x_\sigma$ , о.е.	0,2200	0,1800	0,1600
$x_{\sigma D}$ , о.е.	0,0110	0,0080	0,0060
$x_{\sigma f}$ , о.е.	0,1110	0,1520	0,1590
$r_f$ , о.е.	0,0016	0,0017	0,0018
$x_{\sigma D}$ , о.е.	0,0309	0,0390	0,0420
$r_D$ , о.е.	0,0130	0,0180	0,0180

Отримані залежності параметрів схеми заміщення від початкового значення струму статора можуть бути описані аналітичними вираженнями після відповідної апроксимації. Однак, отримання таких математичних співвідношень, що зв'язують відповідні параметри схеми заміщення і струм статора, цілком природно після виконання подібного дослідження для серії інших турбогенераторів.

Сопоставлення розрахункової залежності струму в обмотці возбуждення (рис. 3, крива 3) з використанням даних, наведених в таблиці, з експериментальною перехідною функцією (крива 1) вказує на суттєве уточнення результатів розрахунку. Максимальне невідповідання розрахункового значення струму в обмотці возбуждення в досвіді з початковим напругою  $0,26U_{ном}$  не перевищило 9,5 %.

Аналіз результатів, отриманих для інших значень напруг на виводах обмотки статора перед виникненням КЗ ( $0,47U_{ном}$  і  $0,7U_{ном}$ ), також свідчить про суттєве уточнення розрахунку струму в гілках ОБГ. Найбільша похибка в усіх розглянутих випадках не перевищила

9,5 %. Уточнення електромагнітних параметрів схеми заміщення після виділення контуру обмотки возбуждення, виконане в роботі, практично не впливало на точність визначення перехідного струму в обмотці статора. Результати розрахунку за даними, наведеними в [6], і вказаними в таблиці, (рис. 4, крива 3) співпали між собою.

**Висновки.**

1. Предложена методика определения по данным опытов короткого замыкания параметров схемы за-  
мещения турбогенератора, отражающих влияние магнитного насыщения путей потоков рассеяния по продольной оси машины при одновременном более точном выделении контура обмотки возбуждения.

2. Получены зависимости параметров эквивалентной схемы за-  
мещения уточненной структуры от начального значения тока короткого замыкания для турбогенератора типа ТВВ-160.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Герасимов С.Е., Соловьев С.Л. Влияние насыщения турбогенераторов на токи короткого замыкания // Установившиеся и переходные режимы работы электрических систем: Тр. ЛПИ. – Л. - 1982. - № 385. – С. 44-47.  
2. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы. – К.: Техніка, 1992. – 168 с.  
3. G.G. Rogozin, I.I. Larina The influence of magnetic saturation of the synchronous machine leakage flux ways on short-circuit transients, in Proceedings of the 6th International Symposium on Short-circuit Currents in Power Systems, 1994, vol.1, paper 1.18.  
4. Галбай М.М., Микляев М.С., Сидельников А.В. Влияние насыщения на частотные характеристики и переходные реактивности синхронных машин // Электротехника. – 1982. - №9. – С. 44-47.  
5. Рогозин Г.Г., Ларина И.И. Об использовании функциональных характеристик при учете влияния насыщения синхронных машин // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1986. - №6. – С. 61-68.  
6. Рогозин Г.Г., Ларин А.М., Ларина И.И. Определение зависимости параметров эквивалентного демпферного контура турбогенератора от начального значения тока короткого замыкания // Электротехника. – 1999. - №12. – С. 14-17.  
7. Ларин А.М., Ткаченко А.А., Ларина И.И. Определение электромагнитных параметров обмотки возбуждения синхронного генератора из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания // Электротехника і Електромеханіка.– 2005.- №2. – С. 52-58.

Стаття надійшла 16.04.2008р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.