

УДК 621. 313.322

А.М. ЛАРИН (канд.техн.наук, доц.), И.И. ЛАРИНА (канд.техн.наук, доц.), А.А. ШЕЙНА

Государственное высшее учебное заведение

«Донецкий национальный технический университет»

lam@elf.dgtu.donetsk.ua

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАСЫЩЕНИЯ НА СОВОКУПНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Выполнено исследование влияния насыщения на частотные характеристики и параметры эквивалентных схем замещения, полученные для промышленных турбогенераторов серии ТВВ мощностью 160 и 320 МВт по данным серии опытов внезапного трехфазного короткого замыкания при различных исходных напряжениях. Установлены аналитические зависимости параметров эквивалентных демпферных контуров в функции начального значения тока короткого замыкания.

*Турбогенератор, насыщения, частотна характеристика, схема замещения, залежність*

**Введение.** Повышение точности исследования переходных процессов в мощных 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 потоков рассеяния. Удобно такие зависимости представить в функции начального значения периодической составляющей тока короткого замыкания, аналогично тем, которые были получены в [1, 2]. Приведенные в [1] зависимости не учитывают действительного распределения токов между обмоткой возбуждения (ОВГ) и эквивалентной демпферной системой (ДС). Поэтому они могут использоваться для учета влияния насыщения на результаты расчета только тока в обмотке статора.

Получение аналитических выражений для правильного учета распределения токов в контурах ротора требует структурной детализации схемы замещения путем выделения контура обмотки возбуждения. Это может быть осуществлено с использованием разработанного в [3] способа синтеза схем замещения, в которых ОВГ представляется самостоятельной многоконтурной цепью.

**Целью настоящей работы** является установление аналитических зависимостей параметров схемы замещения турбогенератора, в которой ОВГ представлена многоконтурной цепью, в функции начального значения периодической составляющей тока внезапного трехфазного короткого замыкания.

**Материалы и результаты исследований.** Исследования проводились для промышленных турбогенераторов типов ТВВ-160-2 и ТВВ-320-2. Принятая в работе схема замещения по продольной оси ротора, отражающая влияние не только вытеснения тока, но и явление насыщения магнитных цепей статора и ротора, приведена на рис. 1.

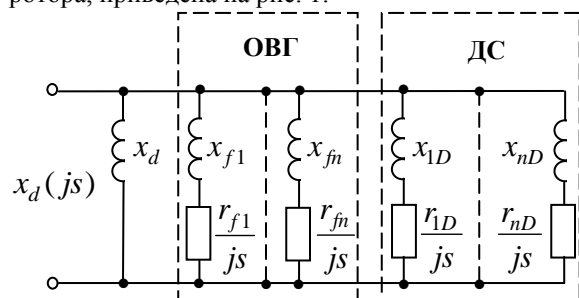


Рисунок 1 - Схема замещения турбогенератора по продольной оси

Использование схемы замещения с вынесенной ветвью намагничивания объясняется тем, что она может использоваться для моделирования переходных процессов как по дифференциальным уравнениям Парка-Горева, так и для аналитического описания электромагнитных процессов.

Опыты внезапного трехфазного короткого замыкания (ВКЗ) выполнялись в условиях испытательного стенда сотрудниками завода «Электросила» (Санкт-Петербург, Россия). Постановка экспериментов соответствовала требованиям ДСТУ ГОСТ 10169-77 «Машины электрические синхронные трехфазные. Методы испытаний» [4]. Во всех опытах с

помощью электромеханических осциллографов регистрировались три фазных тока в обмотках статора, а также ток в обмотке возбуждения. Для этого использовались безындукционные шунты и осциллографические гальванометры, имеющие собственную частоту колебаний 2500 Гц. Каждый из опытов повторялся дважды.

Для определения ненасыщенных значений совокупности электромагнитных параметров эксперименты проводились при таком напряжении на выводах статора, при котором начальное значение периодической составляющей тока в обмотке статора не превышало номинальной величины.

Влияние насыщения оценивалось интегрально путем нахождения частотных характеристик и параметров схем замещения по данным серии опытов, выполненных при различных исходных напряжениях. Последние подбирались таким образом, чтобы начальные значения периодической составляющей тока ВКЗ

© Ларин А.М., Ларина И.И., Шейна А.А., 2011

составляли примерно 2,0; 3,0 и 4,0 о.е., но не более максимальной величины  $0,7U_{НОМ}$ , регламентируемой ГОСТ 10169-77.

Упомянутый отраслевой стандарт, а также рекомендации международной электротехнической комиссии [5] регламентируют процедуру анализа токов в обмотках для нахождения из опытов ВКЗ электромагнитных параметров СМ.

В настоящей работе были выполнены исследования по оценке влияния способа обработки исходных данных на результаты определения частотных характеристики проводимости со стороны обмотки статора на примере турбогенератора типа ТВВ-320-2. Использовались результаты опыта ВКЗ на выводах СМ, выполненного при напряжении  $0,7U_{НОМ}$ . Частотные характеристики рассчитывались в соответствии с ГОСТ 10169-77 [4] по периодической составляющей тока статора, рассчитанной как среднее арифметическое периодических токов трех фаз, а также как среднее значение частотных характеристик, найденных по периодическим токам для каждой из фаз. Периодические составляющие токов в фазах определены как полуразности огибающих кривых фазных токов. Замеры осциллограмм осуществлялись для экстремальных значений токов с дискретностью 0,01 с.

На основании выполненных исследований, для реализации метода экспериментального определения параметров многоконтурных схем замещения [3], была принята стандартная методика обработки осциллограмм токов статора при ВКЗ, рекомендованная ДСТУ ГОСТ 10169-77.

Турбогенератор типа ТВВ-160-2 имеет следующие номинальные параметры в соответствии с данными заводского расчетного формуляра:  $P_{НОМ} = 160$  МВт;  $U_{НОМ} = 18$  кВ;  $I_{НОМ} = 6,04$  кА;  $\cos\varphi_{НОМ} = 0,85$ ;  $I_{fxx} = 715$  А. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора принималось равным  $x_{\sigma} = 0,22$  о.е.

С целью определения ненасыщенных значений электромагнитных параметров опыт проводился из режима холостого хода при напряжении, составляющем  $0,25U_{НОМ}$ . Такому исходному напряжению на выводах обмотки статора соответствует начальный ток возбуждения  $I_{f0} = 148$  А. Величина установившегося тока короткого замыкания в обмотке статора при этом оказалась равной  $I_{VCT} = 0,69$  кА. Таким параметрам установившегося режима короткого замыкания соответствует следующее значение синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси ротора:  $x_d = 2,232$  о.е.

Дальнейший расчет выполнялся во взаимной системе относительных единиц. В качестве базисного тока статора принималось его номинальное значение. Базисный ток ОВГ, рассчитанный для взаимной системы относительных единиц, оказался равным  $I_{fB} = x_{ad}I_{fxx} = (x_d - x_{\sigma})I_{fxx} = 1438$  А.

Аппроксимации подвергались периодическая составляющая тока статора и аperiodический ток в обмотке возбуждения.

Исследования проводились для различных условий по аппроксимации периодической составляющей тока в обмотке статора и аperiodического тока в цепи обмотки возбуждения. Оценивалось влияние числа и постоянных времени затухания экспоненциальных составляющих, аппроксимирующих токи в статоре и роторе. Анализируются варианты с одинаковым и различным количеством экспонент в токах статора и ротора, а также одинаковыми и различными постоянными времени их затухания.

Исследования по выявлению влияния параметров экспоненциальных составляющих в токах статора и возбуждения показали, что погрешности синтеза совокупности параметров эквивалентных схем замещения определяются погрешностью аппроксимации исходных переходных функций. Минимальными, в общем случае, они оказываются при разных постоянных времени составляющих периодического тока статора и аperiodического тока в обмотке возбуждения.

При представлении ОВГ двухконтурной цепью и аппроксимации токов статора и ротора двумя составляющими, имеющими разные постоянные времени затухания, были получены следующие параметры схемы замещения с вынесенной ветвью намагничивания, показанной на рис. 1:

$$x_{f1} = 0,367; r_{f1} = 0,00178; x_{f2} = -0,487; r_{f2} = -0,09697;$$

$$x_{D1} = 7,155; r_{D1} = 0,0521; x_{D2} = 0,348; r_{D2} = 0,0671.$$

Для турбогенератора типа ТВВ-320-2 ( $P_{НОМ} = 320$  МВт;  $U_{НОМ} = 20$  кВ;  $I_{НОМ} = 10,9$  кА;  $\cos\varphi_{НОМ} = 0,85$ ) минимальное напряжение, при котором производились эксперименты, составило  $0,4U_{НОМ}$ . В результате синтеза эквивалентной схемы замещения были получены следующие параметры, соответствующие ненасыщенному состоянию машины:

$$x_{f1} = 0,334; r_{f1} = 0,00152; x_{f2} = -0,339; r_{f2} = -0,077;$$

$$x_{D1} = 13,02; r_{D1} = 0,067; x_{D2} = 0,268; r_{D2} = 0,057.$$

При этом значение синхронного индуктивного сопротивления, рассчитанное по данным режима установившегося трехфазного короткого замыкания, оказалось равным 1,695 о.е.

Исследование влияния насыщения выполнялось при определении совокупности электромагнитных параметров в форме частотных характеристик и параметров эквивалентных схем замещения, в которых обмотки возбуждения отражены самостоятельными двухконтурными цепями. Для турбогенератора ТВВ-320-2 использовались данные регистрации токов в обмотках статора, полученные при следующих исходных напряжениях в опытах ВКЗ: 0,4; 0,5 и 0,7 от номинального.

На рис.2 показаны частотные характеристики проводимости со стороны обмотки статора генератора ТВВ-320, рассчитанные по данным аппроксимации среднего периодического тока статора, соответствующие различным уровням насыщения магнитной системы.

Как следует из рис.2, имеет место увеличение модульных значений проводимости в функции скольжения при увеличении исходного напряжения в опытах ВКЗ. Видно, что увеличение напряжения от 0,4 до  $0,5U_{НОМ}$  практически не приводит к изменению частотных характеристик. Увеличение напряжения в опыте до  $0,7U_{НОМ}$  вызывает увеличение амплитудных значений проводимости в области скольжений ротора от 0,01о.е. до 1,0 о.е от 5 до 15%.

На рис.3 приведены аналогичные зависимости, полученные из серии опытов для турбогенератора типа ТВВ-160-2.

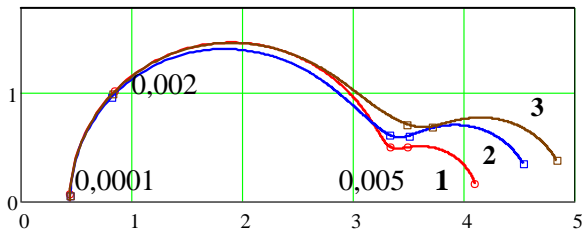


Рисунок 3 – Частотные характеристики  $y_d(j s)$  ТГ типа ТВВ-160-2  
1 -  $U = 0,25U_{НОМ}$ ; 2 -  $U = 0,47U_{НОМ}$ ;  
3 -  $U = 0,7U_{НОМ}$

насыщения.

Рассмотрим методику нахождения таких зависимостей при представлении ОВГ многоконтурной цепью на примере турбогенератора ТВВ-160-2.

На рис.4 приведены амплитудно-фазовые частотные характеристики комплексных коэффициентов участия  $C_f(j s)$ , рассчитанных в соответствии с [3] по данным обработки аперiodических токов в обмотке возбуждения для различных исходных напряжений. Их анализ указывает на то, что в области частот тока в роторе от 0 до 0,01о.е. они отличаются между собой в пределах погрешности измерений и обработки переходных функций. В области же скольжений ротора от 0,1 до 1,0о.е. имеет место закономерные изменения анализируемых характеристик при увеличении напряжения в опытах ВКЗ. Однако получение аналитической зависимости коэффициента  $C_f(j s)$  в функции начального напряжения или тока короткого замыкания для возможности ее использования при синтезе схем замещения затруднительно.

Целесообразнее это сделать непосредственно для параметров эквивалентных схем замещения.

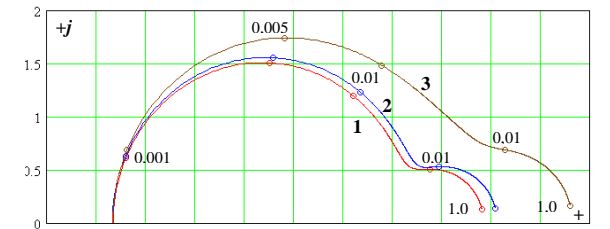


Рисунок 2 - Частотные характеристики  $y_d(j s)$  ТГ типа ТВВ-320-2  
1 – получена при напряжении  $0,4U_{НОМ}$ ;  
2- то же при  $0,5U_{НОМ}$ ; 3 – то же при  $0,7U_{НОМ}$

Из приведенных зависимостей видно, что для турбогенератора типа ТВВ-160-2 имеет место аналогичная зависимость проводимости от уровня насыщения магнитной системы электрической машины. Так при увеличении исходного напряжения от 0,25 до 0,47 номинального значения амплитуда статорной проводимости увеличивается при скольжении 1,0 о.е в 1,13раз. Повышение напряжения до 0,7 номинального вызывает увеличение проводимости в 1,23 раза.

Для учета влияния насыщения при расчете электромагнитных переходных процессов требуется разработка методики аналитического представления зависимости совокупности параметров генераторов от

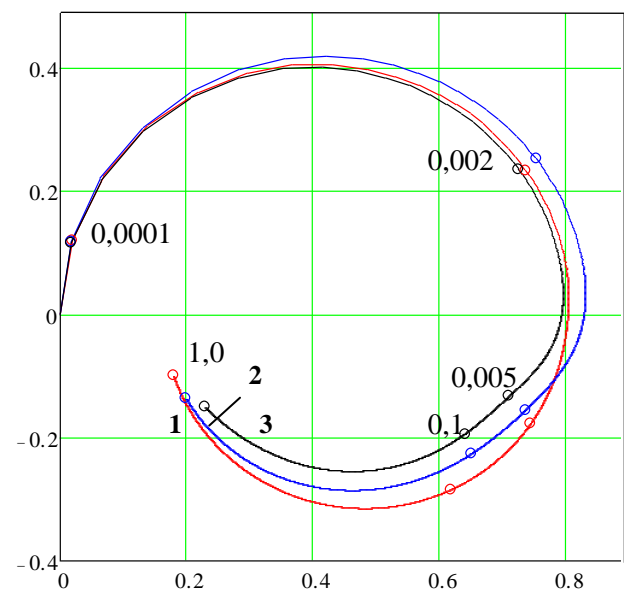


Рисунок 4 - Амплитудно-фазовые частотные характеристики  $C_f(j s)$  ТГ ТВВ-160-2

Проаналізуємо отримані по співвідношенням [3] комплексні провідності обмотки возбуждення для досліджуваної схеми з винесеною гілкою намагнічування (рис.1), представлені на рис.5.

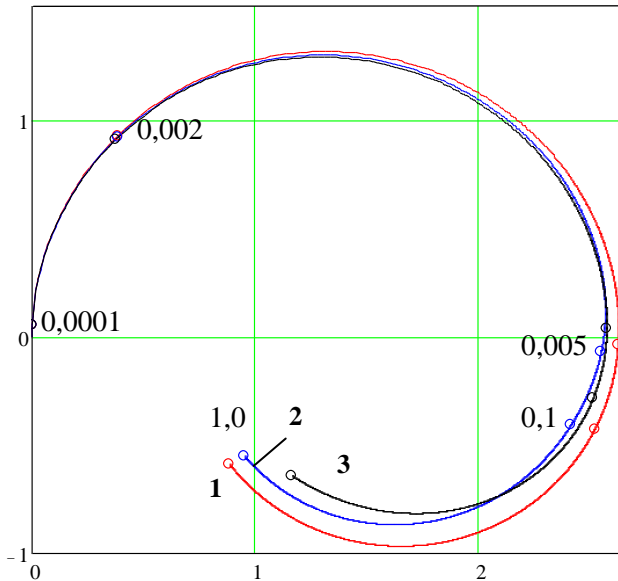


Рисунок 5 - Амплитудно-фазові частотні характеристики провідності ОБГ  $y_f(js)$  ТГ ТГВ-160-2

Аналіз отриманих залежностей дозволяє установити, що вплив насичення практично не проявляється в зміні властивостей еквівалентної демпферної системи при скольженнях менше 0,1 о.е. Це означає, що параметри контура, що має найменшу постійну часу, практично не залежать від початкового значення періодичного струму статора.

Таким чином, виконані дослідження показали доцільність визначення аналітичної залежності від струму короткого замикання тільки параметрів одного контура, що відображає вплив демпферної системи, що має найбільшу постійну часу.

При такому допущенні незалежна від насичення складова провідності схеми заміщення  $y_d(js)_{\text{НЕНАС}}$  буде визначатися наступним співвідношенням:

$$y_d(js)_{\text{НЕНАС}} = \frac{1}{x_d} + y_f(js)_{U=0,25U_{\text{НОМ}}} + \frac{js}{r_{D1} + js \cdot x_{D1}}, \quad (1)$$

де  $x_{D1} = 7,153$ ;  $r_{D1} = 0,053$  - індуктивне і активне опору першого контура, що враховує вплив масивних елементів ротора в експерименті, виконаному при напрузі  $0,25U_{\text{НОМ}}$ , що відповідає ненасиченому стану магнітної системи турбогенератора.

Тоді значення другого еквівалентного демпферного контура можуть бути розраховані по їх провідностям, знайденим по експериментальним частотним характеристикам  $y_d(js)$ , отриманим для різних напруг з урахуванням постійної складової:

$$y_{D2}(js) = y_d(js) - y_d(js)_{\text{НЕНАС}}. \quad (2)$$

Таблиця

$U$	$I''_{II(0)}$	$r_{D2}$	$x_{D2}$
0,25	1,00	0,0671	0,348
0,47	2,15	0,0651	0,303
0,70	3,54	0,0593	0,276

Значення параметрів другого демпферного контура, що відповідають різним початковим періодичним складовим струму короткого замикання, наведені в табл.

Аналіз дискретних значень  $r_{D2}$  і  $x_{D2}$  для різних початкових величин періодичного струму короткого замикання, наведених в табл., дозволило отримати

Сопоставление характеристик  $y_f(js)$ , полученных при различных уровнях насыщения, свидетельствует о практическом их совпадении в области частот от 0 до 0,1 о.е., т.е. в той области, в которой проявляется влияние ОБГ. При больших скольжениях имеет место незначительное, в пределах 5 – 8 % изменение модульного значения исследуемого параметра. Однако, в области скольжений ротора, больших 0,1 о.е. значительно в большей степени проявляется действие демпферной системы. На рис.6 показаны частотные характеристики эквивалентной провідности, отражающей влияние массивных конструктивных элементов ротора турбогенератора типа ТГВ-160-2.

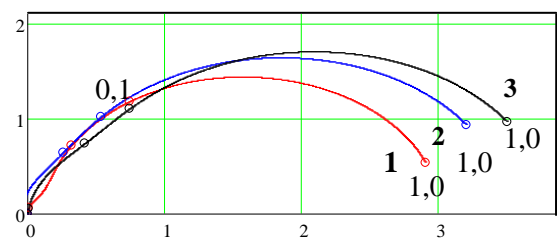


Рисунок 6 - Амплитудно-фазові частотні характеристики  $y_D(js)$  провідності еквівалентної демпферної системи

аналитические выражения для определения зависимостей  $r_{D2}$  и  $x_{D2}$  в функции тока статора при значении последнего более 1 о.е.

$$r_{D2}(I) = r_{D2HEHAC} (0,996 + 0,019I - 0,015I^2); \quad (3)$$

$$x_{D2}(I) = x_{D2HEHAC} (1,16 - 0,183I + 0,022I^2), \quad (4)$$

где  $r_{D2HEHAC} = 0,0671$ ;  $x_{D2HEHAC} = 0,348$  - значения сопротивлений, полученные при напряжении 0,25 от номинального.

Сопоставление частотных характеристик (рис.7), полученных экспериментально по данным опытов короткого замыкания при напряжении  $U = 0,7U_H$  и расчетом с использованием параметров, приведенных в табл., указывает на их удовлетворительное совпадение.

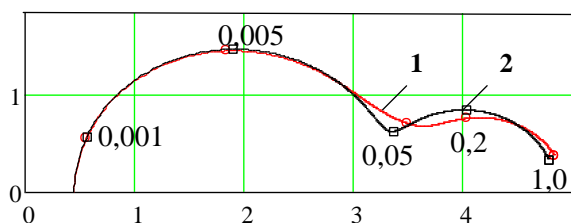


Рисунок 7 - Частотные характеристики  $y_d(j\omega)$  ТГ типа ТВВ-160, полученные при напряжении  $0,7U_{НОМ}$   
1 – экспериментальная; 2 - расчетная

В частности, значения модулей векторов тока на указанных характеристиках во всем диапазоне частот отличаются не более, чем на 4,3%. При этом несовпадение мнимых составляющих оказывается несколько большим. В диапазоне скольжений ротора от 0,05 до 1,0 о.е. оно достигает 8,3%. В указанных пределах имеет место и несовпадение расчетной и экспериментальной частотных характеристик коэффициента распределения  $C_f(j\omega)$ .

Это свидетельствует о том, что полученные аналитические зависимости параметров второго

эквивалентного демпферного контура в функции начального значения тока ВКЗ для турбогенератора типа ТВВ-160-2, удовлетворительно учитывают влияние насыщения на переходные процессы как в обмотке статора, так и в обмотке возбуждения.

Учет влияния насыщения осуществлялся при моделировании переходных процессов при внезапных трехфазных коротких замыканиях на выводах турбогенераторов мощностью 160 МВт типа ТВВ-160-2 и мощностью 320 МВт типа ТВВ-320-2. Для оценки достоверности получаемых результатов путем сопоставления результатов расчета с опытными данными, моделирование выполнялось для тех же значений напряжений, при которых осуществлялись и экспериментальные исследования.

Для турбогенератора типа ТВВ-320-2 использовались схемы замещения, синтезированные для условий проведения экспериментов.

Для турбогенератора типа ТВВ-160-2 использовались полученные аналитические зависимости (3) и (4), позволяющие определять параметры схем замещения, соответствующие любому значению начального периодического тока короткого замыкания.

Расчеты выполнялись на ПЭВМ по программе, реализующей алгоритм интегрирования уравнений Парка-Горева методом Рунге-Кутты четвертого порядка.

Поскольку значения параметров синтезированных схем замещения определялись на основе результатов обработки данных опытов коротких замыканий при изменении токов от максимальных значений до нулевого, а зависимости строились только от начального значения, то приближенный интегральный учет насыщения производился выбором соответствующих параметров без последующего их пересчета на каждом шаге интегрирования дифференциальных уравнений.

При анализе переходных процессов сопоставлялись кривые изменения токов в отдельных фазах обмотки статора и изменение тока в обмотке возбуждения.

Анализ изменения во времени фазных токов обмотки статора указывает на удовлетворительное совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными. Несовпадение расчетных и опытных данных как в области максимальных значений токов, так и минимальных величин не превышает 7,2%. Такая погрешность находится в области ошибки ручной обработки исходных экспериментальных осциллограмм токов в обмотках статора.

Характер изменения тока в обмотке возбуждения также практически совпадает с опытными данными. Экстремальные значения как расчетные, так и экспериментальные совпадают во времени и находятся в области первых двух-трех периодов промышленной частоты.

Максимальное несовпадение значений тока в ОВГ, полученного путем моделирования, с опытными данными наблюдается в начальной стадии переходного процесса в интервале от 0 до 0,1с и достигает 16,3%.

Такая погрешность может быть объяснена тем, что при замерах осциллограмм в области только экстремальных значений не удалось выделить в аperiodической составляющей тока в обмотке возбуждения, составляющих, имеющих постоянные времени, соизмеримые со временем периода промышленной частоты. Дальнейшее повышение точности должно достигаться путем использования при экспериментальных

исследованиях современных регистраторов переходных процессов, позволяющих с большой дискретностью измерять переходные функции токов и напряжений.

В интервале наблюдения переходного тока возбуждения более 0,1с погрешность моделирования значительно снижается и не превышает 9,4%.

Сопоставительный анализ расчетных и опытных зависимостей изменения токов в обмотках статора и ротора для турбогенератора ТВВ-320-2 также свидетельствует о совпадении качества переходных процессов как и для турбогенератора ТВВ-160-2.

Максимальная погрешность в расчете тока в обмотке статора имеет место в момент времени, соответствующий наступлению первого амплитудного значения, и составляет 10,1%. При больших значениях времени отличие анализируемых зависимостей уменьшается и не превышает 6,7%.

Наибольшее несовпадение результатов расчета с опытными значениями тока в обмотке возбуждения для турбогенератора типа ТВВ-320-2 также имеет место в начальной стадии переходного процесса. Погрешность моделирования в этом случае достигает 19,6%.

Выполненные исследования для турбогенератора ТВВ-320-2 также подтверждают вывод о необходимости выделять в составе периодического тока статора и аperiodического тока в обмотке возбуждения составляющие с постоянными времени, соизмеримыми с периодом промышленной частоты.

**Вывод.** Впервые получены зависимости параметров схем замещения с вынесенной ветвью намагничивания для турбогенераторов серии ТВВ мощностью 160 МВт и 320 МВт в функции начального значения периодической составляющей тока внезапного трехфазного короткого замыкания при представлении обмотки возбуждения многоконтурной цепью. Их использование позволит выполнять уточненные расчеты переходных процессов при трехфазных коротких замыканиях с учетом влияния насыщения магнитной системы электрической машины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рогозин Г.Г. Определение зависимости параметров эквивалентного демпферного контура турбогенератора от начального значения тока короткого замыкания / Г.Г. Рогозин, А.М. Ларин, И.И. Ларина // Электротехника. – 1999. – №12. – С. 14-17.

2. Шеина А.А. Определение зависимости параметров эквивалентной схемы замещения турбогенератора от начального тока трехфазного короткого замыкания / А.А. Шеина, А.М. Ларин, И.И. Ларина // Кременчук: Вісник КДПУ. – Вип. №4/2008 (51). – С.113-116.

3. Ларин А.М. Экспериментальное определение параметров схем замещения синхронных машин при представлении обмотки возбуждения многоконтурной цепью / А.М. Ларин, Гуедида Фаузи Бен Килани // Электротехніка і Електромеханіка.– 2008. – №3. – С.37-40.

4. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 73 с.

5. 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.

Надійшла до редколегії 18.03.2011

Рецензент: Г.Г.Рогозін

А. М. ЛАРИН, І. І. ЛАРИНА, Г. О. ШЕІНА  
Державний вищий навчальний заклад  
«Донецький національний технічний університет»

A. LARIN, I. LARINA, A. SHEINA  
State Institution of Higher Education  
«Donetsk National Technical University»

**Дослідження впливу насичення на сукупність електромагнітних параметрів турбогенераторів.** Виконано дослідження впливу насичення на частотні характеристики і параметри еквівалентних схем заміщення, одержаних для промислових турбогенераторів серії ТВВ потужністю 160 та 320 МВт за даними серії дослідів раптового трифазного короткого замикання при різних вихідних напругах. Встановлені аналітичні залежності параметрів еквівалентних демпферних контурів у функції початкового значення струму короткого замикання.  
**Турбогенератор, насичення, частотна характеристика, схема заміщення, залежність.**

**Study of Saturation Influence at the Totality of Turbogenerators Electromagnetic Parameters.** It is executed the research of saturation influence at frequency response characteristic and parameters of equivalent circuits for the industrial turbogenerators of TVV series by power 160 and 320 MW from data of series of sudden three-phase short circuit tests at different initial voltages. Analytical dependences of equivalent damper contours parameters in function of initial value of short circuit current are received.  
**Turbogenerator, saturation, frequency response characteristic, equivalent circuit, dependence.**