



дой оси симметрии ротора. Такая схема замещения по продольной оси представлена на рис.2.

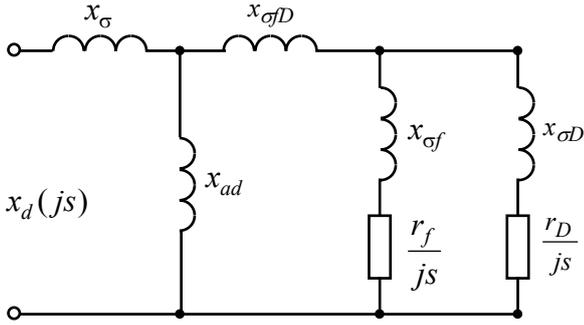


Рисунок 1 – Схема замещения турбогенератора уточненной структуры по оси d

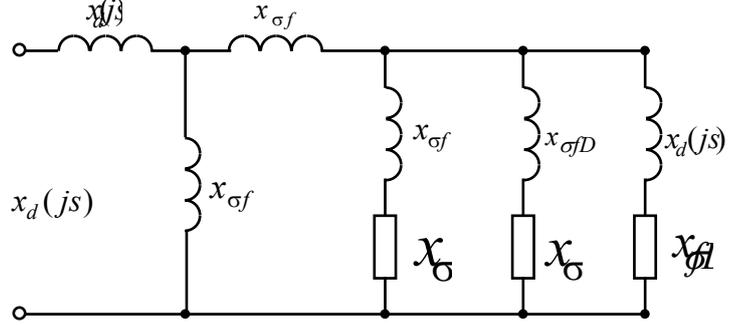


Рисунок 2 – Схема замещения турбогенератора с учетом многоконтурности ДО

Аналогичная задача для схемы замещения с одним демпферным контуром решена в [5] при анализе электромеханических переходных процессов в узлах нагрузки с синхронными двигателями.

#### Материалы и результаты исследований.

Запишем выражения для потокосцеплений обмоток статора, возбуждения и двух демпферных контуров в продольной оси симметрии ротора. Для принятой структуры уточненной схемы замещения (рис.2) они будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \Psi_d &= x_\sigma \cdot i_d + x_{ad} \cdot (i_d + i_{1D} + i_{2D} + i_f); \\
 \Psi_{1D} &= x_{\sigma D_1} \cdot i_{1D} + x_{\sigma fD} \cdot (i_{1D} + i_{2D} + i_f) + x_{ad} \cdot (i_d + i_{1D} + i_{2D} + i_f); \\
 \Psi_{2D} &= x_{\sigma D_2} \cdot i_{2D} + x_{\sigma fD} \cdot (i_{1D} + i_{2D} + i_f) + x_{ad} \cdot (i_d + i_{1D} + i_{2D} + i_f); \\
 \Psi_f &= x_{\sigma f} \cdot i_f + x_{\sigma fD} \cdot (i_{1D} + i_{2D} + i_f) + x_{ad} \cdot (i_d + i_{1D} + i_{2D} + i_f).
 \end{aligned} \tag{3}$$

При условии неизменности индуктивных сопротивлений, входящих в указанные соотношения, выражение (3) является системой линейных алгебраических уравнений.

Ее решение для нахождения токов, которые используются в (1) в матричной форме записи может быть представлена в таком виде:

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_{1D} \\ i_{2D} \\ i_f \end{pmatrix} = \frac{1}{Det} \cdot \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_{1D} \\ \Psi_{2D} \\ \Psi_f \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Главный определитель системы уравнений (4) рассчитывается как:

$$Det = (x_\sigma + x_{ad}) \left[ x_{\sigma D_1} \cdot x_{\sigma D_2} (x_{\sigma f} + x_{\sigma fD}) + x_{\sigma fD} \cdot x_{\sigma f} (x_{\sigma D_1} + x_{\sigma D_2}) \right] + x_\sigma \cdot x_{ad} \left[ x_{\sigma f} (x_{\sigma D_1} + x_{\sigma D_2}) + x_{\sigma D_1} \cdot x_{\sigma D_2} \right].$$

Ее оптимальные коэффициенты находятся из соотношений, учитывающих свойства определителей:

$$\begin{aligned}
 D_{11} &= x_{\sigma D_1} \cdot x_{\sigma D_2} \cdot x_{\sigma f} + (x_{ad} + x_{\sigma fD}) \cdot [x_{\sigma D_1} x_{\sigma D_2} + x_{\sigma D_1} \cdot x_{\sigma f} + x_{\sigma D_2} \cdot x_{\sigma f}]; \\
 D_{12} &= -x_{ad} \cdot x_{\sigma D_2} \cdot x_{\sigma f}; \quad D_{13} = -x_{ad} \cdot x_{\sigma D_1} \cdot x_{\sigma f}; \quad D_{14} = -x_{ad} \cdot x_{\sigma D_1} \cdot x_{\sigma D_2}; \\
 D_{22} &= (x_\sigma + x_{ad}) \cdot [x_{\sigma D_2} \cdot (x_{\sigma f} + x_{\sigma fD}) + x_{\sigma fD} \cdot x_{\sigma f}] + x_\sigma \cdot x_{ad} \cdot [x_{\sigma f} + x_{\sigma D_2}]; \\
 D_{23} &= -x_{\sigma f} \cdot ((x_\sigma + x_{ad}) \cdot x_{\sigma fD} + x_\sigma \cdot x_{ad}); \quad D_{24} = -x_{\sigma D_2} \cdot ((x_\sigma + x_{ad}) \cdot x_{\sigma fD} + x_\sigma \cdot x_{ad}); \\
 D_{33} &= (x_\sigma + x_{ad}) \cdot [x_{\sigma D_1} \cdot (x_{\sigma f} + x_{\sigma fD}) + x_{\sigma fD} \cdot x_{\sigma f}] + x_\sigma \cdot x_{ad} \cdot (x_{\sigma f} + x_{\sigma D_1}); \\
 D_{34} &= -x_{\sigma D_1} \cdot ((x_\sigma + x_{ad}) \cdot x_{\sigma fD} + x_\sigma \cdot x_{ad}), \\
 D_{44} &= (x_\sigma + x_{ad}) \cdot [x_{\sigma D_1} \cdot (x_{\sigma D_2} + x_{\sigma fD}) + x_{\sigma fD} \cdot x_{\sigma D_2}] + x_\sigma \cdot x_{ad} \cdot (x_{\sigma D_2} + x_{\sigma D_1}).
 \end{aligned}$$

Матрица коэффициентов D симметрична, т.е.  $D_{21} = D_{12}$ ,  $D_{31} = D_{13}$ ,  $D_{32} = D_{23}$ ,  $D_{41} = D_{14}$ ,  $D_{42} = D_{24}$ ,  $D_{43} = D_{34}$ .

Следует отметить, что использование свойств определителей, позволило упростить аналогичные коэффициенты, полученные в [5] для схемы замещения с одним эквивалентным демпферным контуром. Это приводит к сокращению объема необходимых вычислений.

В соответствии с полученными соотношениями совместно с дифференциальными уравнениями, записанными в форме Парка-Горева, был разработан алгоритм, реализованный в программе расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов в синхронных машинах при представлении их демпферной системы двумя эквивалентными контурами для каждой оси симметрии ротора. Программа разрабатывалась в среде прикладного математического пакета MathCAD.

Тестирование программного продукта производилось путем сопоставления результатов расчета токов в обмотках статора и ротора при внезапном трехфазном коротком замыкании на выводах турбогенератора типа ТВВ-160-2 при представлении массива ротора одним и двумя демпферными контурами. Параметры двухконтурной схемы с одинаковыми постоянными времени подбирались таким образом, чтобы их эквивалентная частотная характеристика совпадала с характеристикой одного контура, имеющего ту же постоянную времени. Совпадение результатов расчетов указывает на достоверность разработанной программы.

Оценка эффективности представления массивного ротора турбогенератора двумя эквивалентными контурами осуществлялась путем сопоставления результатов моделирования трехфазных коротких замыканий на выводах промышленного генератора типа ТВВ-160-2 из режима холостого хода при напряжении  $0,47 U_H$  с экспериментальными данными.

Синтез эквивалентных схем замещения турбогенератора при отражении свойств массивного ротора одним (рис.1) и двумя контурами (рис.2) осуществлялся по методике, изложенной в [6].

Параметры схем замещения турбогенератора определялись путем выполнения следующих расчетных процедур:

- по параметрам экспонент, аппроксимирующих периодический ток в обмотке статора и аperiodический в обмотке возбуждения, зарегистрированных в опытах трехфазного короткого замыкания, определяются частотные характеристики входной проводимости со стороны обмотки статора  $y_d(js) = 1/x_d(js)$  и проводимость обмотки возбуждения  $y_f(js)$ ;

- находится частотная характеристика коэффициента участия периодического тока статора в ветви обмотки возбуждения:

$$C_f(js) = \frac{y_f(js)}{y_d(js)};$$

- предполагая известными параметры  $x_\sigma$ ,  $x_{ad}$  и  $x_{\sigma fd}$  рассчитываются частотные характеристики проводимости, измеренной относительно зажимов сопротивления  $x_{ad}$  ( $Y_D^*(js)$ ) и результирующей проводимости ОВГ и демпферной системы по следующим соотношениям:

$$Y_D^*(js) = \frac{1}{\frac{1}{y_d(js)} - x_\sigma} - \frac{1}{x_{ad}}; Y_f(js) + Y_D(js) = \frac{1}{\frac{1}{Y_D^*(js)} - x_{\sigma fd}};$$

- находится коэффициент участия всех роторных токов в токе обмотки статора:

$$C_{f2}(js) = \frac{Y_D^*(js)}{Y_D^*(js) + \frac{1}{X_{ad}}};$$

- определяется коэффициент участия тока обмотки возбуждения в суммарном токе роторных контуров:

$$C_{f1}(js) = \frac{C_f(js)}{C_{f2}(js)};$$

- вычисляются собственные проводимости обмотки возбуждения и демпферной системы:

$$Y_f(js) = C_{f1}(js) \cdot \frac{1}{\frac{1}{Y_D^*(js)} - x_{\sigma fd}}; Y_D(js) = \frac{1}{\frac{1}{Y_D^*(js)} - x_{\sigma fd}} - Y_f(js).$$

По полученным частотным характеристикам  $Y_f(js)$  и  $Y_D(js)$  рассчитывались активные и индуктивные сопротивления роторных контуров для двух вариантов исследования. При этом ОВГ во всех случаях представлялась одним контуром, а демпферная система одним и двумя. Для обоих исследуемых вариантов было принято:  $x_\sigma = 0,18$ ;  $x_{ad} = 2,052$ ;  $x_{\sigma fd} = 0,008$ ;  $x_{\sigma f} = 0,152$ ;  $R_f = 0,0017$ . Параметры роторных цепей при представлении демпферной системы одним контуром имеют следующие значения:  $x_{\sigma D} = 0,039$ ;  $R_D = 0,018$ . Для двухконтурной -  $x_{\sigma D_1} = 1,6212$ ;  $R_{D_1} = 0,00977$ ;  $x_{\sigma D_2} = 0,0344$ ;  $R_{D_2} = 0,019$ .

На рис.3 и рис.4 приведены расчетные зависимости изменения тока в обмотках статора и ротора соответственно при представлении массива ротора одним контуром (кривые 1). Сопоставление токов статора с опыт-

ными данными (рис.3, кривая 2) указывает на их удовлетворительное совпадение. Погрешность в области амплитудных значений токов не превышает 3,0 %. Несовпадение при этом токов в ОВГ составляет 9,2 %.

Расчет токов в обмотке статора при представлении демпферной системы турбогенератора двумя контурами, практически совпал с результатами, полученными для одноконтурной схемы (рис.3, кривая 3). Это объясняется тем, что частотные характеристики входных проводимостей со стороны обмотки статора совпадают между собой во всех рассматриваемых случаях. Сопоставление расчетных зависимостей тока в ОВГ (рис.4, кривая 3) с экспериментальной переходной функцией свидетельствует о том, что учет массива ротора двумя контурами позволил повысить точность расчетов тока в обмотке возбуждения, по сравнению со схемой замещения, в которой массив представлен одним контуром. Погрешность расчета в этом случае снизилась до 5,3 %.

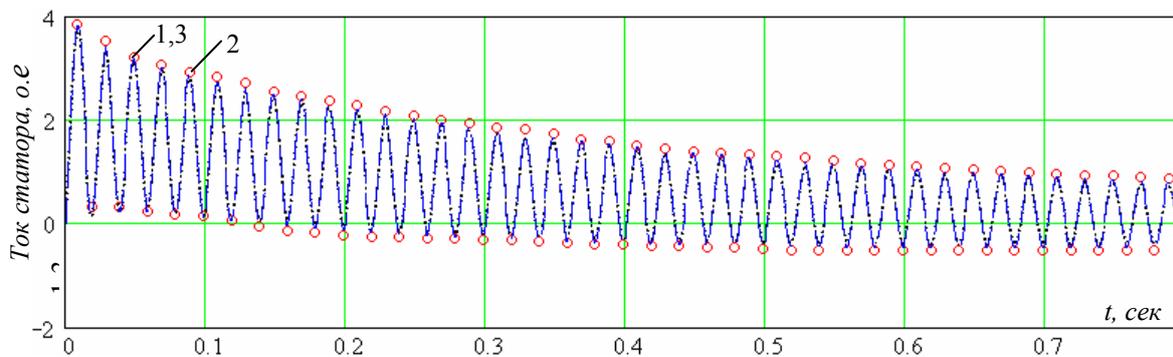


Рисунок 3 – Изменение фазного тока обмотки статора турбогенератора

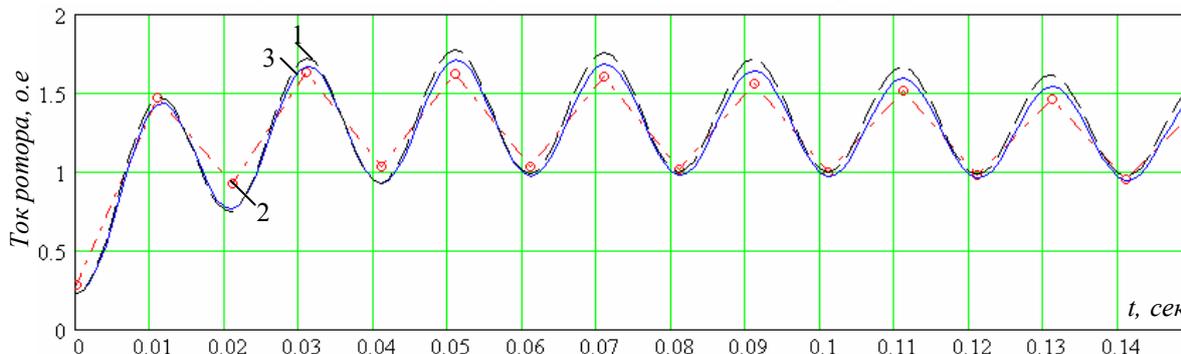


Рисунок 4 – Изменение тока в ОВ турбогенератора TBB-160-2

**Вывод.** Получены математические соотношения для моделирования переходных процессов в турбогенераторах по уточненной схеме замещения при представлении демпферной системы двумя эквивалентными контурами. Определены параметры и показана целесообразность использования уточненных схем замещения для исследования режимов трехфазных коротких замыканий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сивокобыленко В.Ф. Идентификация параметров синхронных и асинхронных машин по данным измерений на неподвижной машине / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, В.С. Гармаш // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1989. - № 4. - С.49-57.
2. Рогозин Г.Г. Применение импульсного метода для определения электромагнитных параметров массивных конструктивных элементов ротора турбогенератора / Г.Г. Рогозин, Ю.И. Печуркин // Электротехника. - 1992. - № 6-7. - С.17-21.
3. Рогозин Г.Г. Об использовании функциональных характеристик при учете влияния насыщения синхронных машин / Г.Г. Рогозин, И.И. Ларина // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1986. - №6. - С.61-68.
4. Escarela-Pereze R. Unique Determination of One-Damper D-Axis Circuits of Synchronous Machines Using Finite-Element Simulations / Escarela-Pereze R., Campero-Littlewood E., Niewierowicz T., Hernandez-Anaya O // IEEE Transactions on Magnetics, 2002. -Vol. 38. - №2. - P. 1245-1248.
5. Сивокобыленко В.Ф., В.К. Лебедев Анализ переходных процессов в узлах энергосистемы с мощными синхронными двигателями. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1992. - № 3. - С.68-75.
6. 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.

Рекомендовано д.т.н. Сивокобыленко В.Ф.