

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБМОТКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТГВ-200М ПРИ КВАЗИСТУПЕНЧАТЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Рогозин Г.Г., Заболотный И.П., Пятлина Н.Г., Невенгловский А.В.

Донецкий национальный технический университет

rgg@elf.dgtu.donetsk.ua, ivp@elf.dgtu.donetsk.ua, a_neven@mail.ru

The paper is dealt with the profound researching of the processes arising from the detection signals intended for identifying the inter turn short-circuit faults in a turbogenerator excitation winding. The operating condition group of the thyristor excitation system and the rectifier designed for the initial excitation at starting the power unit are used as the sources of the relatively small stepped voltage alterations across the slip rings of the rotor. In general terms, based on the theoretical data the fault criterion of the short-circuit on-line identification or at no-load condition is suggested.

ВВЕДЕНИЕ

Повреждение витковой изоляции обмотки возбуждения является одним из наиболее распространённых видов неисправностей турбогенераторов. Этому способствуют: изменение центробежных сил, действующих на обмотку в процессе частых пусков и остановов энергоблоков, а также происходящие при этом температурные изменения проводников, вызывающие деформации изоляции; изменения в условиях охлаждения отдельных витков обмотки; неудовлетворительное качество сборки ротора при его производстве, связанное с наличием заусенцев или частиц посторонних материалов.

В случае одновитковых коротких замыканий дефект практически не обнаруживает себя в изменениях отдельных режимных параметров генератора, однако развитие повреждения может приводить к тепловым перегревам в роторе и, как следствие, к недопустимым вибрациям валопровода энергоблока.

Вопросам диагностирования нарушения состояния витковой изоляции турбогенераторов уделено большое внимание в монографии [1], отражающей в значительной мере опыт зарубежных достижений. К наиболее существенным новейшим достижениям в рассматриваемой области следует отнести работы [2] и [3].

Метод диагностики КЗ витков [2] основан на анализе функций

$$y = f(P, Q, u, I, k_{\mu}) \text{ и } (y + I_f) / y = \alpha\%,$$

где y – расчётное значение тока возбуждения; I_f – фактическое значение тока возбуждения; P – активная мощность; Q – реактивная мощность; u – напряжение на выводах генератора; I – ток статора; $\alpha\%$ – критерии повреждения витковой изоляции; k_{μ} – коэффициент насыщения генератора.

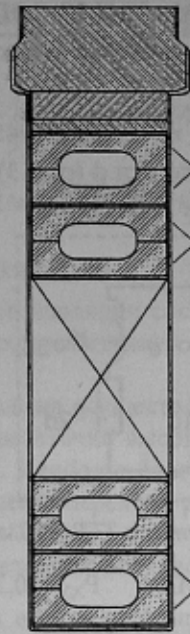
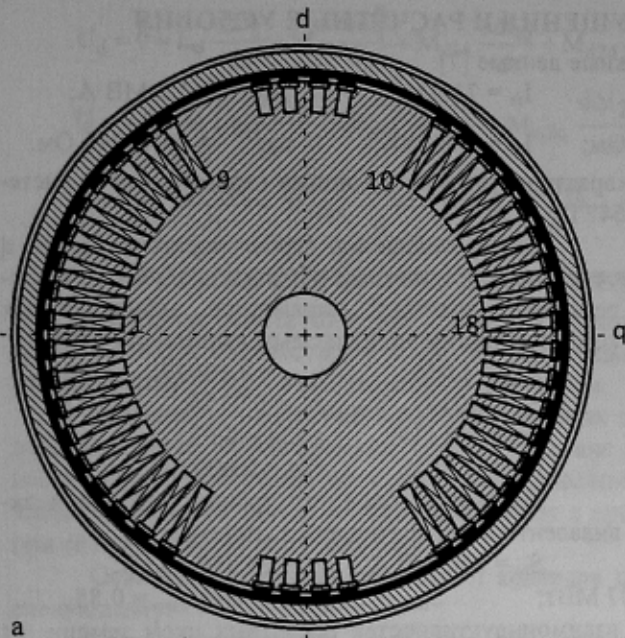
Выбор вида вышеприведённых функций обоснован тем, что как показали исследования, при возникновении витковых коротких замыканий, хотя ток возбуждения и растёт, но относительная величина реактивной мощности уменьшается, поскольку эффективное значение магнитного поля генератора ослабляется.

В [3] предлагается использовать увеличение тока обмотки возбуждения при возникновении виткового КЗ. При этом следует использовать характеристики машины, отражающие зависимость реактивной мощности от тока возбуждения для заданных активных мощностей. Указанные характеристики определяются по данным опытов холостого хода, короткого замыкания и работы в режиме нулевого значения коэффициента мощности. Испытания следует проводить периодически в связи с изменением со временем характеристик вследствие старения материалов. Решение проблемы диагностики предлагается проводить с использованием математического аппроксиматора функций. Наилучший подход в данном случае связан с применением нейронных сетей искусственного интеллекта.

Целью настоящей работы является анализ переходных процессов в обмотке возбуждения турбогенератора ТГВ-200М при подаче на обмотку возбуждения квазиступенчатых воздействий. Статья в определённой мере является продолжением работы [4], отличаясь более углублённым подходом к исследованию проблемы, связанным с отказом от ряда принятых ранее допущений и постановкой новых задач. В частности: рассматриваются несколько видов возможных повреждений и учёт возможных переходных сопротивлений в месте повреждения; уточнены значения электромагнитных параметров расчётной модели турбогенератора с использованием рекомендаций [5]; рассматриваются два вида источников диагностических воздействий (рабочая группа тиристорной системы и агрегат начального возбуждения [6]) и др. Значительное внимание уделяется выбору критерия повреждения витковой изоляции обмотки возбуждения в условиях эксплуатации турбогенератора.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБМОТКИ РОТОРА И СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обмотка возбуждения турбогенератора состоит из двух групп катушек, укладываемых в пазы ротора. Катушки, принадлежащие одной группе, располагаются концентрично на одном полюсном делении ротора относительно его большого зуба и соединены между собой перемычками. К концам нижних витков внутренних катушек припаяны шины токоподвода. Число катушек в группе равно 9, количество витков в катушке – 10. Разрез ротора и паза показаны на рисунке 1.



Проводник витка состоит из двух элементарных проводников П-образного сечения, при сложении которых образуется продольный канал. Витковая изоляция выполнена из текстолитовых полосок и приклеена лаком к одной стороне витка.

Для упрощения соединения катушек они соединены между собой последовательно по схеме: верхний виток одной – с верхним витком следующей, соответственно нижний виток – с нижним (рис. 2). При таком соединении чётные катушки имеют правую намотку, а нечётные – левую.

Общее количество витков обмотки возбуждения:

$$N = s \cdot a \cdot n = 2 \cdot 9 \cdot 10 = 180,$$

где s – количество групп катушек; a – количество катушек в группе; n – количество витков в катушке.

Клинья из дюралюминия крепят в пазах ротора обмотку возбуждения. Бандажный узел ротора предназначен для крепления лобовых частей обмотки возбуждения.

При пуске генератора из остановленного состояния обмотка возбуждения генератора подключается к агрегату начального возбуждения, представляющего собой выпрямительное устройство и трансформатор, питаемые от сети собственных нужд электростанции и подключаемые одновременно с включением автомата гашения поля (АГП) от его блок-контактов.

Реализация тестовых воздействий при применении предлагаемого диагностического подхода осуществляется путём подачи ступенчатых изменений (входных сигналов) напряжения на кольца ротора в рабочем режиме турбогенератора – путём формирования заданных изменений через систему управления рабочей группой тиристоров системы возбуждения и в режиме холостого хода турбогенератора – в процессе включения агрегата начального возбуждения.

В последнем случае возможна подача тестового воздействия при различных оборотах ротора в процессе пуска энергоблока, в частности, при критических оборотах, т.е. при повышенных вибрациях ротора. При этом не требуется изменять регламент изменения оборотов турбины при пуске энергоблока. Диагностическим сигналом является ток возбуждения (или статора).

В последнем случае возможна подача тестового воздействия при различных оборотах ротора в процессе пуска энергоблока, в частности, при критических оборотах, т.е. при повышенных вибрациях ротора. При этом не требуется изменять регламент изменения оборотов турбины при пуске энергоблока. Диагностическим сигналом является ток возбуждения (или статора).

В последнем случае возможна подача тестового воздействия при различных оборотах ротора в процессе пуска энергоблока, в частности, при критических оборотах, т.е. при повышенных вибрациях ротора. При этом не требуется изменять регламент изменения оборотов турбины при пуске энергоблока. Диагностическим сигналом является ток возбуждения (или статора).



Рисунок 2 – Схема катушечных соединений обмотки возбуждения турбогенератора ТГВ-200М

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, ПРИНИМАЕМЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И РАСЧЁТНЫЕ УСЛОВИЯ

Турбогенератор ТГВ-200М имеет следующие каталожные данные [7]:

$$P_N = 200 \text{ МВт}; \quad U_{fN} = 420 \text{ В}; \quad \cos\varphi_N = 0,85; \quad I_{fN} = 710 \text{ А}; \quad S_N = 241,3 \text{ МВ}\cdot\text{А};$$

$$I_{fN} = 1890 \text{ А}; \quad U_N = 15,75 \text{ кВ}; \quad r_s^{15^\circ} = 0,001945 \text{ Ом}; \quad I_N = 8,625 \text{ кА}; \quad r_f^{15^\circ} = 0,001945 \text{ Ом}.$$

Схема замещения турбогенератора по оси d (рис. 3) характеризуется следующими параметрами (в системе отн. ед.): $r_s = 0,00183$; $r_f = 0,886 \cdot 10^{-3}$; $x_{\sigma f} = 0,198$; $x_{ad} = 1,647$ [8].

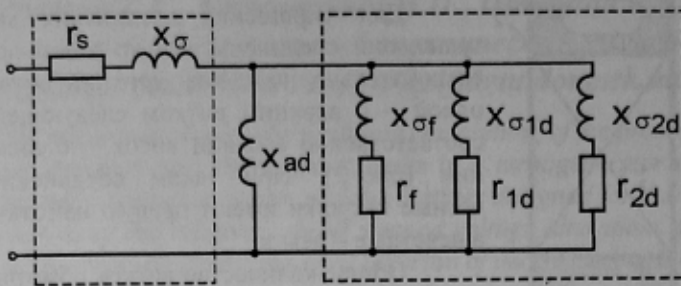


Рисунок 3 – Схема замещения турбогенератора ТГВ-200М

$$u_k = 11 \%; \quad I_{XX} = 0,5 \%; \quad P_K = 0,6 \text{ МВт}; \quad P_{XX} = 0,207 \text{ МВт}; \quad S_{нагр} = S_N; \quad \cos\varphi_{нагр} = 0,85.$$

При определении приведённых выше параметров и взаимоиндуктивностей расчётных схем замещения принимались следующие допущения:

- сложные явления в массивных элементах ротора представляются ограниченным числом эквивалентных контуров (равных двум), полученным путём эквивалентирования многоконтурных схем замещения синтезированных по экспериментальным частотным характеристикам статорной проводимости машины по осям d и q;
- магнитная система машины по путям основного магнитного потока и потоков рассеяния в процессе диагностирования ротора в режиме холостого хода является ненасыщенной, а в режиме нагрузки – уровень насыщения (при используемом уровне возмущения по величине напряжения на кольцах ротора) принимается неизменным;
- величины взаимоиндукции между контурами схемы замещения пропорциональны произведению чисел витков соответствующих элементов конструкции турбогенератора;
- замыкание происходит между соседними витками в пазу;
- эквивалентная постоянная АРВ турбогенератора и тиристорной системы возбуждения равна 0,01 с.

Индуктивности рассеяния и взаимоиндукции короткозамкнутого витка с остальной частью обмотки возбуждения и другими элементами магнитной системы турбогенератора определялись для двух случаев расположения КЗ витка: в ближайших пазах ротора относительно оси d и оси q.

Теоретически в роторе могут возникать КЗ только внутри одного паза и включать один или несколько витков, вплоть до полного межвиткового КЗ внутри паза. КЗ происходят, как правило, через определённое активное сопротивление. Значение его может изменяться от «металлического», принимаемого обычно равным 0,01 Ома (аналогично болтовому соединению), до «переходного», имеющего в десятки раз большие значения (обуславливаемых проявлением действующих на витковые проводники центробежных сил).

В соответствии с изложенным в дополнение к идеализированному варианту расчёта (КЗ одного витка с переходным сопротивлением в месте повреждения равным нулю) рассматриваются также следующие гипотетические случаи повреждений ротора: КЗ одного витка через $r_{неп} = 0,01$ Ома и 0,1 Ома; КЗ двух витков при $r_{неп} = 0, 0,01$ и 0,1 Ома; КЗ катушки в пазу при $r_{неп} = 0$.

Определение электромагнитных параметров схем замещения для исследуемых видов повреждений дано в приложении.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Переходный процесс при возмущении со стороны системы возбуждения описывается следующей системой дифференциальных уравнений Парка-Горева для приращений величин режимных параметров:

$$\Delta u_f(t) = L_f \frac{d\Delta i_f}{dt} + M_{f1d} \frac{d\Delta i_{1d}}{dt} + M_{f2d} \frac{d\Delta i_{2d}}{dt} + M_{fd} \frac{d\Delta i_d}{dt} + M_{ffk3} \frac{d\Delta i_{fk3}}{dt} + r_f \Delta i_f$$

$$0 = L_{1d} \frac{d\Delta i_{1d}}{dt} + M_{f1d} \frac{d\Delta i_f}{dt} + M_{1d2d} \frac{d\Delta i_{2d}}{dt} + M_{d1d} \frac{d\Delta i_d}{dt} + M_{ffk3} \frac{d\Delta i_{fk3}}{dt} + r_{1d} \Delta i_{1d}$$

$$0 = L_{2d} \frac{d\Delta i_{2d}}{dt} + M_{f2d} \frac{d\Delta i_f}{dt} + M_{1d2d} \frac{d\Delta i_{1d}}{dt} + M_{d2d} \frac{d\Delta i_d}{dt} + M_{ffk3} \frac{d\Delta i_{fk3}}{dt} + r_{2d} \Delta i_{2d}$$

$$0 = L_{1q} \frac{d\Delta i_{1q}}{dt} + M_{1q2q} \frac{d\Delta i_{2q}}{dt} + M_{q1q} \frac{d\Delta i_q}{dt} + r_{1q} \Delta i_{1q}$$

$$0 = L_{2q} \frac{d\Delta i_{2q}}{dt} + M_{1q2q} \frac{d\Delta i_{1q}}{dt} + M_{q2q} \frac{d\Delta i_q}{dt} + r_{2q} \Delta i_{2q}$$

(1)

$$\begin{aligned}
 U_d = 0 &= L_d \frac{d\Delta i_d}{dt} + M_{fd} \frac{d\Delta i_f}{dt} + M_{d1d} \frac{d\Delta i_{1d}}{dt} + M_{d2d} \frac{d\Delta i_{2d}}{dt} + M_{dfk3} \frac{d\Delta i_{fk3}}{dt} + M_{q1q} \Delta i_{1q} + M_{q2q} \Delta i_{2q} + L_q \Delta i_q + (r_s + r_{вш}) \Delta i_d \\
 U_q = 0 &= - \left(L_q \frac{d\Delta i_q}{dt} + M_{q1q} \frac{d\Delta i_{1q}}{dt} + M_{q2q} \frac{d\Delta i_{2q}}{dt} \right) + M_{df} \Delta i_f + M_{d1d} \Delta i_{1d} + M_{d2d} \Delta i_{2d} + L_d \Delta i_d - (r_s + r_{вш}) \Delta i_q \\
 0 &= L_{fk3} \frac{d\Delta i_{fk3}}{dt} + M_{ffk3} \frac{d\Delta i_f}{dt} + M_{fk31d} \frac{d\Delta i_{1d}}{dt} + M_{fk32d} \frac{d\Delta i_{2d}}{dt} + r_{fk3} \Delta i_{fk3}
 \end{aligned}$$

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Основная задача контроля состояния витковой изоляции состоит в выявлении повреждения (образа неисправности) и количественном анализе интенсивности изменения мер сходства измеряемого вектора признаков состояния ротора с его эталонным значением.

Реализация измерений в рабочих режимах должна осуществляться в процессе эксплуатации через определённые промежутки времени, обеспечивающие достаточно высокий уровень наблюдаемости динамики процесса развития повреждения межвитковой изоляции. Наиболее благоприятные условия для выявления неустойчивых замыканий между витками возникают в процессе перехода ротора через критические обороты турбины при её пуске или отключении блока.

Основные положения методики контроля состояния витковой изоляции ротора могут быть сведены к следующему:

- для каждого вновь вводимого или эксплуатируемого турбогенератора устанавливается эталонная характеристика приращения тока ротора (статора);
- проведение диагностических процедур при пуске блока осуществляется при стандартных условиях: по тепловому состоянию ротора; по скорости вращения ротора; по методике стабилизации магнитного состояния стали ротора при малых напряжённостях магнитного поля и др.

В качестве меры сходства образов состояния витковой изоляции используются меры евклидова и внутримножественного расстояний [10]. Евклидово расстояние определяется по формуле

$$D_I^2 = D^2(\underline{Y}, \underline{Y}_\ominus) = \|\underline{Y} - \underline{Y}_\ominus\|^2 = \underline{Y}^T \underline{Y} - \underline{Y}^T \underline{Y}_\ominus - \underline{Y}_\ominus^T \underline{Y} + \underline{Y}_\ominus^T \underline{Y}_\ominus, \quad (2)$$

где $\underline{Y}_\ominus, \underline{Y}$ – матрицы эталонного образа тока и измеряемого в процессе проведения периодического контроля, представляемые в виде совокупности признаков (изменении тока ротора или статора на тестовое ступенчатое воздействие) в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n :

$$\underline{Y}_\ominus = \begin{bmatrix} Y_{1\ominus} \\ Y_{2\ominus} \\ \vdots \\ Y_{n\ominus} \end{bmatrix}, \quad \underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}$$

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА
БІБЛІОТЕКА
ДОНДТУ

Внутримножественное расстояние между точкой, соответствующей образу x и множеству точек, соответствующих образам $\{a^i\}$, представляющие класс k образов, как известно, определяется как среднеквадратичное расстояние между x и k элементами множества $\{a^i\}$. Квадрат расстояния между точками x и a^i равен

$$D_{II}^2 = D^2(\{Y^j\}, \{Y^i\}) = \sum_{k=1}^n (Y_k^j - Y_k^i)^2 \quad (3)$$

где $i, j = 1, 2 \dots k-1; i \neq j$.

В рассматриваемом случае в качестве фиксированных точек принимались максимальное и текущие значения приращений переходной функции тока ротора в регистрируемом диапазоне, тогда:

$$D_{III}^2 = D^2(Y, Y_{max}) = \sum_{k=1}^n (Y_{max} - Y_k)^2 \quad (4)$$

В качестве критерия исправности витковой изоляции ротора предлагается использовать следующее выражение:

$$D_j^2 < k \cdot D_{расч}^2 \quad (5)$$

где $D_{расч}^2$ – расчётное значение евклидова расстояния для конкретных условий диагностического эксперимента и контролируемого параметра ($j = f, s$); k – коэффициент запаса, принимаемый в задачах диагностики не более 0,5.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ИХ АНАЛИЗ

Как следует из данных таблицы максимальные отклонения (в долях приращений тока возбуждения при $t \leq 3$ с) в рассматриваемых режимах диагностирования находятся в пределах 1,9 – 15,3 %. При этом наименьшее значение характерно для случая КЗ одного витка ($r_{пер} = 0$) в режиме холостого хода энергоблока. В случае КЗ двух витков этот показатель увеличивается примерно до 3,7 %, а при КЗ катушечной группы – до 15,3 %.

Таблица 2 – Результаты расчётов диагностических сигналов и внутримножественных расстояний при межвитковых КЗ в роторе турбогенератора ТГВ-200М

Характеристика повреждения	Режим работы	Параметры входного сигнала		Показатели эффективности диагностирования			
				Изменение тока ротора, о.е.		Изменение тока статора, о.е.	
		$\Delta u_f, \%$	τ_e, c	$\delta_{fmax}, \%$	ΔD_{fIII}^2	$\delta_{smax}, \%$	ΔD_{sIII}^2
КЗ одного витка без переходного сопротивления ($r_{пер} = 0$)	XX	10	0,01	1,89	$1,4 \cdot 10^{-4}$	1,30	$8,0 \cdot 10^{-13}$
	Нагр	10	0,01	1,90	$2,1 \cdot 10^{-3}$	1,40	$3,9 \cdot 10^{-8}$
То же (АНВ)	XX	25	0,002	1,89	$8,9 \cdot 10^{-4}$	1,30	$5,1 \cdot 10^{-12}$
КЗ одного витка через $r_{пер} = 0,01$ Ома	XX	10	0,01	1,89	$8,0 \cdot 10^{-5}$	1,30	$6,9 \cdot 10^{-14}$
	Нагр	10	0,01	1,93	$1,2 \cdot 10^{-3}$	1,42	$3,4 \cdot 10^{-9}$
То же $r_{пер} = 0,1$ Ом	XX	10	0,01	1,89	$6,5 \cdot 10^{-5}$	1,30	$1,3 \cdot 10^{-14}$
	Нагр	10	0,01	1,93	$9,8 \cdot 10^{-4}$	1,42	$7,2 \cdot 10^{-10}$
КЗ двух витков при $r_{пер} = 0$	XX	10	0,01	3,68	$6,1 \cdot 10^{-4}$	2,40	$4,1 \cdot 10^{-12}$
	Нагр	10	0,01	3,76	$9,2 \cdot 10^{-3}$	2,60	$2,0 \cdot 10^{-7}$
То же $r_{пер} = 0,01$ Ома	XX	10	0,01	3,68	$4,7 \cdot 10^{-4}$	2,36	$1,7 \cdot 10^{-12}$
	Нагр	10	0,01	3,76	$7,1 \cdot 10^{-3}$	2,59	$8,4 \cdot 10^{-8}$
То же $r_{пер} = 0,1$ Ома	XX	10	0,01	3,68	$4,4 \cdot 10^{-4}$	2,37	$1,4 \cdot 10^{-12}$
	Нагр	10	0,01	3,76	$6,6 \cdot 10^{-3}$	2,60	$6,8 \cdot 10^{-8}$
КЗ двух витков при $r_{пер} = 0$ (АНВ)	XX	25	0,01	3,68	$3,8 \cdot 10^{-3}$	2,36	$2,6 \cdot 10^{-11}$
КЗ катушки при $r_{пер} = 0$	XX	10	0,01	15,08	$1,6 \cdot 10^{-2}$	9,47	$8,12 \cdot 10^{-11}$
	Нагр	10	0,01	15,29	$2,38 \cdot 10^{-1}$	9,47	$3,96 \cdot 10^{-6}$

ВЫВОДЫ

К основным результатам работы можно отнести следующее:

- 1 Теоретически обоснован новый метод диагностики витковых замыканий обмотки возбуждения;
- 2 Предложена методика применения метрических мер распознавания образов выявления повреждений витковой изоляции в широком диапазоне возможных видов её повреждения;
- 3 Предложен диагностический критерий, основанный на использовании в модифицированном виде внутримножественного расстояния между регистрируемыми (с частотой опроса 3 кГц) приращениями эталонного и диагностического сигналов токов в обмотках ротора и статора в трёхсекундном диапазоне переходного процесса;
- 4 Даны рекомендации по выбору наиболее эффективного режима диагностирования (режим XX энергоблока) и учёту коррелирующих факторов при оценке полученных результатов измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Диагностика турбогенераторов. –Л: Наука, 1989. –119 с.
- 2 Li Yonggang et al. A new method of inter turn short-circuit fault diagnose of steam turbine generator rotor windings. 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM-2002) Book of Abstracts, p.372.
- 3 Vilaragut M. et al. Diagnostic of Turbogenerator Rotor Short-circuit Turns Utilizing Artificial Neural Networks 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM-2002) Book of Abstracts, p.392.
- 4 Рогозин Г.Г., Заболотный И.П., Ковязин В.А., Бех М.К. Перспективні способи діагностування міжвиткових коротких замикань обмотки збудження турбогенератора. Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія “Електротехніка і енергетика”. Випуск 50. Донецьк: ДонНТУ, 2002. –190 с.; С. 181-188
- 5 Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А. и др. Турбогенераторы: расчёт и конструкция. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.
- 6 Морозова Ю.А. Параметры и характеристики вентильных систем возбуждения мощных синхронных генераторов. – М.: Энергия, 1976. – 146 с.
- 7 Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справ. материалы для курс. и дипл. проектирования: Учебн. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
- 8 Отчёт по теме Г-21-74 (№ гос. регистрации 74012165) Экспериментальные частотные характеристики и их исследование. Донецкий политехнический институт, научно-исследовательский сектор. – 1975. – 164с.
- 9 Пятлина Н.Г., Невенгловский А.В. К вопросу о представлении ротора турбогенератора при математическом моделировании переходных процессов в электрических системах. //Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”, випуск 41: Донецьк: ДонДТУ, 2002. – 249 с.
- 10 Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1976. – 512 с.
- 11 Данилевич Я.Б., Домбровский В.В., Казовский Е.Я. Параметры машин переменного тока, – М. – Л.: Наука. – 1965. – 392 с.

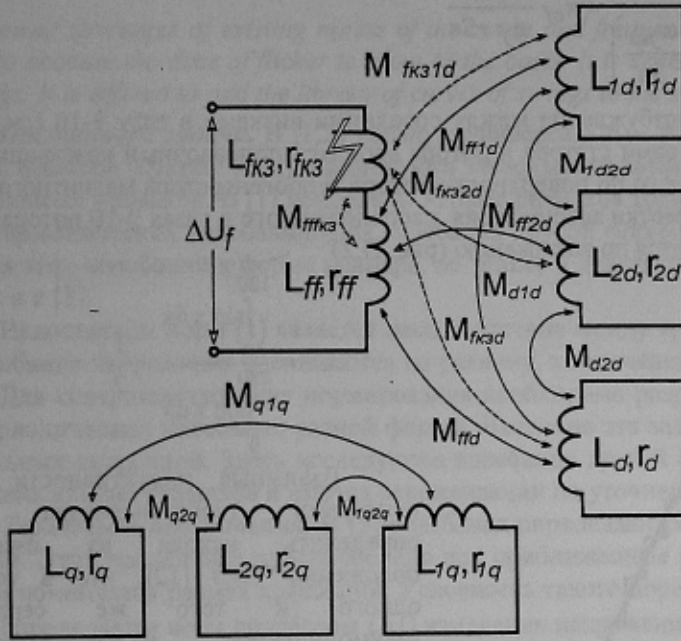
12 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи – 7-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ – ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРУЕМЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Идентифицируемые параметры для случая короткого замыкания одного витка отображены на рис. П.1.

Активное сопротивление КЗ витка определяется исходя из соотношения между линейной длиной КЗ проводника обмотки возбуждения и её полной длиной, или (упрощённо) исходя из соотношений:

- для КЗ витка:



$$r_{fk3} = r_f \frac{\omega_{fk3}}{\omega_{ff}} = r_f \frac{1}{\omega - 1}$$

- для оставшейся части обмотки возбуждения:

$$r_{ff} = r_f - r_{fk3}$$

Индуктивность рассеяния пазовой части одной катушечной стороны [11]

$$L_{RnK} = \mu_0 l_R s_n^2 (\lambda_{Rn} + \lambda_{Rr}), \quad (\text{П.1})$$

где S_n - число катушечных сторон (стержней) в пазу; l_R - длина активной части ротора, см.

Удельная магнитная проводимость пазовой части обмотки возбуждения

$$\lambda_{Rn} = \frac{h_{nR}}{3b_{nR}} + \frac{h_K}{b_{nR}}$$

где h_{nR} - высота паза обмотки ротора, занятая обмоткой; b_{nR} - средняя ширина паза; h_K - высота клина.

Удельная магнитная проводимость потока рассеяния по головкам зубцов

$$\lambda_{Rr} = 0,20 + \frac{\delta}{2t_R}$$

где t_R - зубцовое деление ротора; δ - воздушный зазор.

Полюсные катушки ротора соединены последовательно. Поэтому индуктивность пазового рассеяния всей обмотки L_{Rn} по сравнению с L_{RnK} (П.1) увеличится в

$$2 \cdot 2pQ_R,$$

где Q_R - число катушек на один полюс; p - число пар полюсов.

Так как число последовательно соединённых витков одного полюса составляет

$$\omega_R = S_n Q_R,$$

тогда

$$L_{Rn} = 2p\mu_0 l_R \frac{\omega_R^2}{Q_R} 2(\lambda_{Rn} + \lambda_{Rr}) \cong \omega_R^2 \lambda_{Rn} \frac{1}{Q_R}, \quad (\text{П.2})$$

где ω_R - число витков обмотки ротора турбогенератора на полюс;

Q_R - число полюсных катушек обмотки ротора на полюс.

Пренебрегая составляющей индуктивного сопротивления рассеяния лобовой части, из выражения (П.2) следует

$$L_{ff} = x_{af} \left(\frac{w_f}{2p} - 1 \right)^2 \frac{1}{w_f/2p},$$

где w_f - число витков обмотки ротора;

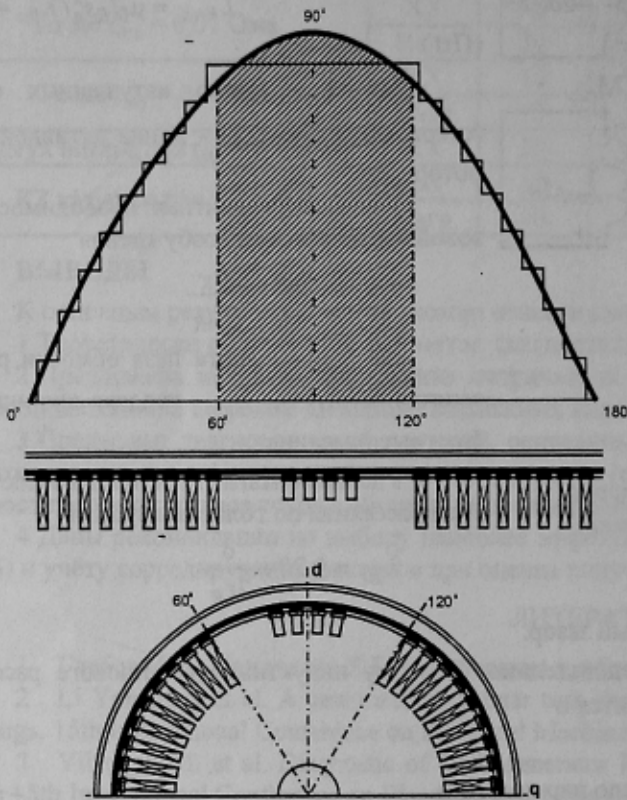
$$L_{fk3} \cong L_{Rn} \cong \omega_R^2 \cdot \lambda_{Rn} \cdot \frac{1}{Q_R} \cong \omega_R^2 \cdot \lambda_{Rn} \cdot \frac{1}{\frac{\omega_R}{Sn}} = x_{of} \left(\frac{\omega_{fk3}}{\frac{\omega_f}{2p}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\frac{\omega_R}{Sn}}$$

Таким образом, для КЗ витков

$$x_{fk3} = L_{fk3} = x_{of} \left(\frac{\frac{\omega_{fk3}}{2p}}{\frac{\omega_f}{2p}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\left(\frac{\omega_{fk3}/2p}{\omega_f/2p} \right) / \left(\frac{\omega_{fk3}}{Sn} \right)} = x_{of} \frac{\omega_{fk3}^2}{\omega_f \cdot Sn}$$

В случае возникновения КЗ в обмотке возбуждения между соседними витками в пазу 9-10 (см. рис. 1) при определении взаимоиндукции между контурами статора и ротора вводится поправочный коэффициент C^K . Последний учитывает сокращение распределённого по поверхности ротора турбогенератора магнитного потока индукции, пронизывающего контур КЗ витка обмотки возбуждения, расположенного в пазах 9-10 ротора.

Определение коэффициента C^K производится по выражению (рис. П.2)



$$C^K = \frac{\int_0^{120} \sin x \, dx}{\int_0^{180} \sin x \, dx} = \frac{1}{2}$$

Взаимные индуктивности между контурами турбогенератора можно определить исходя из известного положения ТОЭ [12], что в условиях одного и того же сердечника взаимоиндукция между разными обмотками пропорциональна произведению витков этих обмоток.

Таким образом

$$M_{ff1d} \cong x_{ad} w_{ff} w_{1d}$$

Поскольку

$$w_{1d} = \text{invar.}, w_{ff} = w_f - 1, \text{ то}$$

$$M_{ff1d} = x_{ad} \frac{w_f - 1}{w_f}$$

Совершенно очевидно, что

$$M_{ff2d} = M_{ff1d}; \quad M_{ffs} = M_{ff1d};$$

$$M_{1dd} = M_{2dd} = x_{ad};$$

$$M_{fk3ld} \cong x_{ad} w_{fk3} w_{1d}$$

Рисунок П.2 – Формирование магнитной индукции потока ротора

Аналогично приведенному выше выражению

$$M_{fk3ld} = x_{ad} \frac{w_{fk3}}{w_f} = x_{ad} \frac{1}{w_f}$$

Тогда

$$M_{fk32d} = M_{fk3ld}; \quad M_{fk3d} = M_{fk3ld}; \quad M_{fk3f} \cong x_{ad} w_{ff} w_{fk3}$$

Поскольку $w_{ff} = w_f - 1$, $w_{fk3} = 1$ то

$$M_{fffk3} = x_{ad} \frac{w_{ff}}{w_f} \cdot \frac{w_{fk3}}{w_f} = x_{ad} \frac{w_f - 1}{w_f^2} \cdot w_{fk3}$$