

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БАНДАЖНЫХ УЗЛОВ РОТОРА

Рогозин Г.Г., Ковязин В.А., Пятлина Н.Г.

Донецкий государственный технический университет

rgg@elf.dgtu.donetsk.ua

The paper dealt with mathematical simulation of the trailing transients in the massive constructional elements of the turbogenerator rotor and analyzing the results of calculating, by means of the MATHCAD system, the impulse transient functions in the form of voltage appearing at the rotor slip-rings during damping the eddy currents in the massive rotor. Recommendations are given about features of implementing the technical state inspection of the rotor end bells at the thermal power plant or manufacturer conditions.

Повышение уровня надежности и экономичности эксплуатации генерирующих и потребляющих элементов электроэнергетических систем следует отнести к актуальным проблемам, имеющим народно-хозяйственное значение.

Одна из наиболее важных проблем этого направления связана с обеспечением контроля состояния непроводниковых элементов конструкции ротора, в частности, его бандажных колец, не выявленные дефекты которых могут приводить к тяжёлым авариям. Между тем, из анализа известных средств и методов диагностики турбогенераторов, следует, что в мировой практике отсутствуют методы обнаружения усталостных и коррозионных трещин бандажных колец при вращающемся и неподвижном роторе на собранной отключенной от сети машине.

Разработанные методики диагностирования непроводниковых элементов конструкции машин переменного тока позволяют обеспечить контроль состояния бандажных колец ротора турбогенератора.

Установление принципиальной возможности использования импульсной переходной функции для оценки состояния сопряжений ЭКР рассматривалось в [1], а задача обнаружения дефектов бандажных колец по изменению контактного давления их посадочных поверхностей, исключая приведенные выше недостатки, в [2].

Настоящая работа ставит своей целью:

- 1) проведение углубленного анализа переходных функций вихревых токов в ЭКР с использованием современной системы MathCAD;
- 2) разработку промышленных методик диагностирования ротора в условиях эксплуатации и производства турбогенераторов.

Моделирование переходных процессов проводилось с использованием базовых схем замещения объекта моделирования, приведенных на рис.1. Ветви элементов схемы, влияние которых на характер переходного процесса анализируется показаны на рисунке в виде цепей, подключаемых ключами S2 - S5. Демпферная система ротора представляется двумя эквивалентными контурами.

Основные допущения соответствуют принятым в [1]. Параметры элементов схемы замещения, как и в работе [1] имеют следующие значения (в системе отн. ед.):

1) для турбогенератора ТГВ-200М ($S_N=235,3$ МВА, $U_N=15,75$ кВ, $I_N=8,625$ кА, $\cos \varphi_N=0,85$): $x_\sigma=0,177$, $r=0,00183$, $x_{\sigma f}=0,198$, $r_f=0,886 \cdot 10^{-3}$, $x_{\sigma 1d}=1,036$, $r_{1d}=0,017$, $x_{\sigma 2d}=0,118$, $r_{2d}=0,0505$, $x_{\sigma D}=0,06588$, $x_{ad}=1,647$, $i_{fx}=710$ А;

2) для трансформатора ТДЦ-250000/220 ($U_{BH}=242$ кВ, $U_{HH}=15,75$ кВ, $P_X=130$ кВт, $P_K=660$ кВт, $u_K=11\%$, $I_{XX}=0,5\%$); активное и индуктивное сопротивления трансформатора, приведенные к мощности турбогенератора, $x_T=193,3$, $r_T=0,0137 \cdot 10^{-3}$;

3) емкости схемы формирования видеоимпульса, обмотки возбуждения и входных параметров измерительного комплекса (C_2, r_j): $C_1=900$ мкФ, $C_{pot}=0,606$ мкФ, $C_2=5$ пФ, $r_j=1000$ кОм. Соответствующие сопротивления в системе отн. ед.: 0,0206; 30,536; $3,701 \cdot 10^6$; 5810,6.

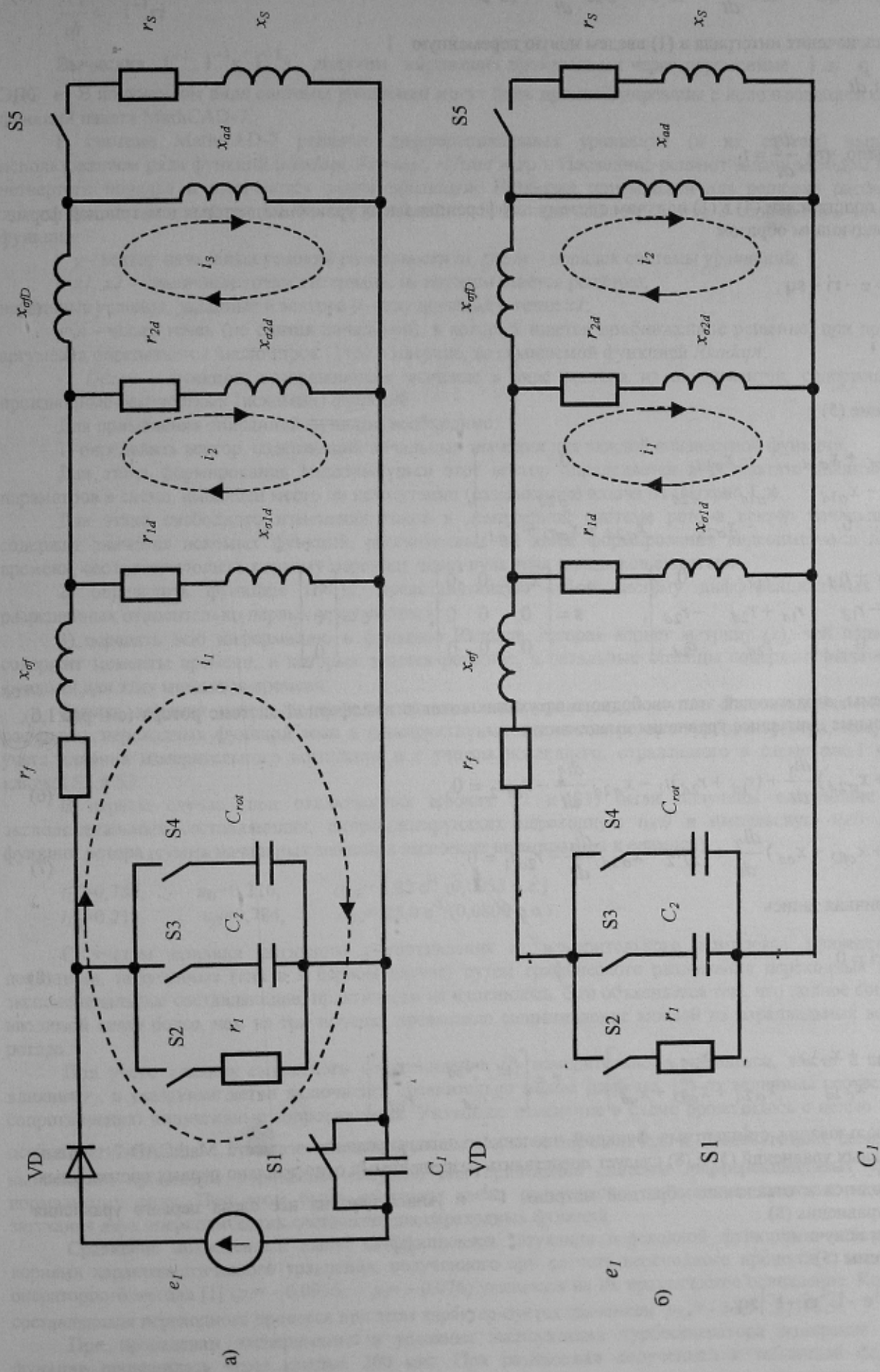
Дифференциальные уравнения для схемы замещения рис. 1, а имеют следующий вид:

- для контура протекания тока i_1

$$(x_{\sigma f} + x_{\sigma 1d}) \frac{di_1}{dt} + (r_f + r_{1d})i_1 + x_{C1} \int i_1 dt - x_{\sigma 1d} \frac{di_2}{dt} - r_{1d}i_2 = e_1; \quad (1)$$

- для контурных токов i_2 и i_3 соответственно

$$(x_{\sigma 1d} + x_{\sigma 2d}) \frac{di_2}{dt} + (r_{1d} + r_{2d})i_2 - x_{\sigma 1d} \frac{di_1}{dt} - r_{1d}i_1 - x_{\sigma 2d} \frac{di_3}{dt} - r_{2d}i_3 = 0, \quad (2)$$



а) – этап формирования видеомпульса; б) – этап свободного затухания токов в демферной системе.
 Рисунок 1 – Базовые схемы замещения турбогенератора при моделировании переходных процессов в роторе

$$(x_{\sigma 2d} + x_{\sigma fD} + x_{ad}) \frac{di_3}{dt} + r_{2d} i_3 - x_{\sigma 2d} \frac{di_2}{dt} - r_{2d} i_2 = 0. \quad (3)$$

Для исключения интеграла в (1) введем новую переменную

$$q = \int i_1 dt. \quad (4)$$

Очевидно, что $\frac{dq}{dt} = i_1$.

После подстановки (4) в (1) получим систему дифференциальных уравнений, которая в матричной форме запишется следующим образом

$$\begin{aligned} \mathbf{l} \frac{d\mathbf{i}}{dt} &= \mathbf{e} - \mathbf{r}\mathbf{i} - \mathbf{s}\mathbf{q}, \\ \frac{d\mathbf{q}}{dt} &= \mathbf{i}. \end{aligned} \quad (5)$$

В системе (5)

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} x_{\sigma f} + x_{\sigma 1d} & -x_{\sigma 1d} & 0 \\ -x_{\sigma 1d} & x_{\sigma 1d} + x_{\sigma 2d} & -x_{\sigma 2d} \\ 0 & -x_{\sigma 2d} & x_{\sigma 2d} + x_{\sigma fD} + x_{ad} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_f + r_{1d} & -r_{1d} & 0 \\ -r_{1d} & r_{1d} + r_{2d} & -r_{2d} \\ 0 & -r_{2d} & r_{2d} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s} = \begin{bmatrix} x_{C1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Для схемы, отражающей этап свободного затухания токов в демпферной системе ротора (см. рис.1,б), дифференциальные контурные уравнения имеют вид:

$$(x_{\sigma 1d} + x_{\sigma 2d}) \frac{di_1}{dt} + (r_{1d} + r_{2d}) i_1 - x_{\sigma 2d} \frac{di_2}{dt} - r_{2d} i_2 = 0, \quad (6)$$

$$(x_{\sigma 2d} + x_{\sigma fD} + x_{ad}) \frac{di_2}{dt} + r_{2d} i_2 - x_{\sigma 2d} \frac{di_1}{dt} - r_{2d} i_1 = 0. \quad (7)$$

Их матричная запись

$$\mathbf{l} \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \mathbf{r}\mathbf{i} = 0, \quad (8)$$

где

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} x_{\sigma 1d} + x_{\sigma 2d} & -x_{\sigma 2d} \\ -x_{\sigma 2d} & x_{\sigma 2d} + x_{\sigma fD} + x_{ad} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_{1d} + r_{2d} & -r_{2d} \\ -r_{2d} & r_{2d} \end{bmatrix}.$$

Для использования стандартных функций численного интегрирования в пакете MathCAD-7 системы дифференциальных уравнений (5) и (8) следует представить разрешенными относительно первых производных.

Эта задача сводится к отысканию обратной матрицы \mathbf{l}^{-1} и умножению на нее слева первого уравнения системы (5) и уравнения (8).

При этом получим:

для системы (5)

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{i}}{dt} &= \mathbf{l}^{-1} \mathbf{e} - \mathbf{l}^{-1} \mathbf{r}\mathbf{i} - \mathbf{l}^{-1} \mathbf{s}\mathbf{q}, \\ \frac{d\mathbf{q}}{dt} &= \mathbf{i}; \end{aligned} \quad (9)$$

для системы (8)

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = -\mathbf{I}^{-1}\mathbf{r}\mathbf{i} \quad (10)$$

Вычислив \mathbf{I}^{-1} , $\mathbf{I}^{-1}\mathbf{r}$, $\mathbf{I}^{-1}\mathbf{s}$ получим выражения производных через переменные \mathbf{i} и \mathbf{q} и заданные ЭДС \mathbf{e} . В полученном виде системы уравнений могут быть проинтегрированы с использованием стандартных функций пакета MathCAD-7.

В системе MathCAD-7 решение дифференциальных уравнений (и их систем) выполняется с использованием ряда функций (*rkadapt*, *Rkadapt*, *rkfixed* и др.). Последние решают задачу методом Рунге-Кутты четвертого порядка и отличаются рядом признаков. Наиболее приемлемой для решения рассматриваемой задачи представляется функция *Rkadapt*(y , $x1$, $x2$, n , D), выполняющая решение с переменным шагом. В этой функции:

- y - вектор начальных условий размерности m , где m – порядок системы уравнений;
- $x1$, $x2$ – граничные точки интервала, на котором ищется решение;

начальные условия, заданные в векторе y – это значения в точке $x1$;

- n - число точек (не считая начальной), в которых ищется приближенное решение; при помощи этого аргумента определяется число строк ($1+n$) в матрице, возвращаемой функцией *Rkadapt*;
- $D(x,y)$ – функция, возвращающая значение в виде вектора из m элементов, содержащих первые производные неизвестных (искомых) функций.

Для применения описанной функции необходимо:

- 1) определить вектор, содержащий начальные значения для каждой неизвестной функции.

Для этапа формирования видеоимпульса этот вектор определяется в результате анализа режимных параметров в схеме, имеющей место до коммутации (размыкания) ключа S1 (см. рис. 1,а).

Для этапа свободного изменения токов в демпферной системе ротора вектор начальных условий содержит значения искомых функций, рассчитанных на этапе формирования видеоимпульса для момента времени, соответствующего первому переходу через нуль тока заряда конденсатора;

- 2) определить функцию $D(x,y)$, представляющую собой систему дифференциальных уравнений, разрешенных относительно первых производных;

3) передать всю информацию в функцию *Rkadapt*, которая вернет матрицу (z), чей первый столбец содержит моменты времени, в которых ищется решение, а остальные столбцы содержат значения искомых функций для этих моментов времени.

Оценка влияния цепей измерительного комплекса проводилась путем сопоставления характеристик расчетных переходных функций тока в конструктивных элементах ротора турбогенератора, полученных без учета влияния измерительного комплекса и с учетом последнего, отражаемого в схеме рис.1 включением ключей S2 и S3.

В первом случае (при отключенных ключах S2 и S3) были получены следующие параметры экспоненциальных составляющих, аппроксимирующих переходную $i_D(t)$ и импульсную $u_f(t)$ переходную функции ротора (сумма начальных значений экспонент нормирована к единице):

$$\begin{aligned} i_{D1} &= 0,789, & u_{f1} &= 0,216, & \alpha_{D1} &= 1,82 \text{ с}^{-1} (0,0058 \text{ о.е.}) \\ i_{D2} &= 0,211, & u_{f2} &= 0,784, & \alpha_{D2} &= 25,0 \text{ с}^{-1} (0,0800 \text{ о.е.}) \end{aligned}$$

С учетом влияния активного сопротивления r_1 измерительного комплекса приведенные выше показатели, полученные (как и в первом случае) путем графического разложения переходных функций на экспоненциальные составляющие, практически не изменились. Это объясняется тем, что полное сопротивление вводимой ветви более, чем на три порядка превышало сопротивление каждой из параллельных ветвей схемы ротора.

При учете влияния емкостного сопротивления C_2 измерительного комплекса, как и в случае учета влияния r_1 , в указанные ветви включались сравнительно малые (порядка 1% от величины соответствующего сопротивления) индуктивные сопротивления. Указанное изменение в схеме проводилось с целью исключения особенности матрицы \mathbf{I} , связанной с обращением в нуль ее определителя и, следовательно, невозможностью выполнения процедуры обращения матрицы для приведения системы дифференциальных уравнений к нормальному виду. При этом были получены также практически неизменные значения коэффициентов затухания двух апериодических составляющих переходных функций.

Сравнение приведенных выше коэффициентов затухания переходной функции с действительными корнями характеристического уравнения, полученного при расчете переходного процесса с использованием операторного метода [1] ($p_1 = -0,0056$, $p_2 = -0,076$) указывает на их практическое совпадение. Колебательная составляющая переходного процесса при этом характеризуется значением $p_{3,4} = -31,91 \pm j106,9$.

При проведении эксперимента в условиях эксплуатации турбогенератора измерение переходной функции проводилось через каждые 200 мкс. При разложении полученной в табличной форме кривой переходного процесса на экспоненциальные составляющие были получены параметры, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры экспоненциальных составляющих ЭДС обмотки возбуждения и тока в ЭКР генератора ТГВ-200М в опыте импульсного воздействия

Параметр	Порядковый номер				
	1	2	3	4	5
Начальные значения i_{fk} , д.е.	0,125	0,238	0,150	0,223	0,264
Начальные значения i_{Dk} , д.е.	0,666	0,277	0,046	0,010	0,001
Коэффициенты затухания α_{Dk} , с ⁻¹	0,568	2,613	9,947	70,38	600,3

Увеличение количества составляющих рассматриваемых переходной и импульсной переходной функций, очевидно, связано с проявлением реальных физических процессов в массивных конструктивных элементах ротора, учитываемых при проведении расчетов приближенно в схеме замещения рис. 1 в виде двух контуров с постоянными параметрами.

Сопоставление коэффициентов затухания указывает на одинаковый порядок численных значений расчетных коэффициентов со значениями для второй и третьей экспоненциальных составляющих, полученных на турбогенераторе в условиях эксплуатации.

Следует отметить, что параметры расчетной схемы замещения ротора определялись путем синтеза по одной осциллограмме затухания постоянного тока в обмотке статора неподвижной машины. При скорости движения ленты осциллографа 5 м/с замеры кривой переходного тока производились через 500 мкс, то есть с существенно меньшей частотой и значительно большей погрешностью измерения, обусловленной ручной обработкой переходной характеристики.

Из изложенного может быть сделан вывод о пренебрежимо малом влиянии измерительного комплекса на параметры переходных характеристик при их определении импульсным методом.

Как следует из анализа, проведенного по методике, аналогичной рассмотренной выше, влияние витковой емкости обмотки возбуждения турбогенератора проявляется только в уменьшении частоты и коэффициента затухания колебательной составляющей ($p_{3,4} = -0,065 \pm j10,14$) при сохранении неизменными коэффициентов затухания двух апериодических составляющих.

Моделирование с учетом влияния цепей блочного трансформатора проводилось по схеме рис.1 при включенном ключе S5.

Аппроксимация зависимости $i_D(t)$ экспоненциальными составляющими позволила получить следующие характеристики составляющих переходного процесса:

$$\begin{aligned} i_{D1} &= 3,57 \text{ д.е.}, & \alpha_{D1} &= 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ о.е.}, \\ i_{D2} &= -2,44 \text{ д.е.}, & \alpha_{D2} &= 1,55 \cdot 10^{-5} \text{ о.е.}, \\ i_{D3} &= -0,13 \text{ д.е.}, & \alpha_{D3} &= 0,091 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

Анализируя последние можно отметить, что две из них, затухающие с постоянными времени 370 с и 205 с практически не влияют на начальную (наиболее информативную) часть свободного переходного процесса. Третья апериодическая составляющая затухает с постоянной времени 0,035 с. При не учете влияния блочного трансформатора значение постоянной времени наиболее быстро затухающей составляющей равно 0,04 с. При решении операторным методом, были получены следующие корни характеристического уравнения:

$$p_1 = -0,0054, \quad p_2 = -0,076, \quad p_3 = -7 \cdot 10^{-6}.$$

Сопоставление приведенных корней с данными расчета идеализированного процесса показывает, что первый и второй корни практически совпадают. Третий корень характеризует апериодическую составляющую, затухающую с постоянной времени, равной 455 с. Эта составляющая практически не оказывает влияния на начальную часть диагностического сигнала.

В связи с практически совпадающими коэффициентами затухания быстро затухающей апериодической составляющей можно сделать вывод о том, что проведение измерений при разомкнутой обмотке высшего напряжения блочного трансформатора практически не оказывает влияния на начальную часть переходной функции и, следовательно, на результат диагностики состояния конструктивных элементов ротора машины.

Основной причиной физического характера, обуславливающей особенности переходных процессов в роторе, удаленном из расточки статора, является исключение пути основного магнитного потока турбогенератора. Моделирование процессов в рассматриваемом случае осуществлялось по схемам рис.1 при значении сопротивления взаимной индукции $x_{\sigma D} \ll x_{ad}$.

При расчете свободного переходного процесса получены следующие значения параметров экспоненциальных составляющих, суммой которых представлена зависимость $i_D(t)$:

$$\begin{aligned} i_{D1} &= 0,0893 \text{ д.е.}, & \alpha_{D1} &= 0,0156 \text{ о.е.}, \\ i_{D2} &= 0,9107 \text{ д.е.}, & \alpha_{D2} &= 0,283 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

При расчете рассматриваемого процесса с использованием операторного метода получены следующие корни характеристического уравнения системы:

$$p_1 = -0,054, \quad p_2 = -0,281.$$

Как следует из сопоставления приведенных данных со случаем не удаленного ротора, коэффициенты затухания аperiodических составляющих увеличились примерно в три-четыре раза.

При проведении испытаний в условиях завода-изготовителя были получены следующие данные [1]:

$$\begin{array}{ll} u_{f1} = 0,105 \text{ д.е.}, & \alpha_{D1} = 0,0064 \text{ о.е.}, \\ u_{f2} = 0,290 \text{ д.е.}, & \alpha_{D2} = 0,0360 \text{ о.е.}, \\ u_{f3} = 0,605 \text{ д.е.}, & \alpha_{D3} = 0,1450 \text{ о.е.} \end{array}$$

Различие в значениях коэффициентов затухания для быстрозатухающей слагающей $u_f(t)$, полученной экспериментальным и расчетным методами составляет 100%, что может быть объяснено ростом погрешностей при упрощенном представлении массивных элементов конструкции ротора двухконтурной схемой замещения и сравнительно низкой взаимоиндуктивностью между ветвями последней.

На основании результатов экспериментальных исследований, проведенных в процессе пооперационной сборки ротора турбогенератора ТГВ-200М в условиях завода "Электротяжмаш" (г. Харьков), установлено, что задачи диагностирования ротора в условиях его производства могут быть сведены только к контролю качества установки бандажных колец.

Основные положения методики контроля последних включают следующее:

1) для каждого типоразмера из производимых на заводе-изготовителе турбогенераторов устанавливается эталонная характеристика, отражающая стабильность внутримножественных мер сходства образа состояния ротора для ряда машин, имеющих идентичные свойства используемых материалов, качества обработки поверхностей ЭКР и допустимых отклонений от заданного класса точности изготовления последних;

2) проведение диагностических процедур осуществляется при стандартных условиях: а) по тепловому состоянию ротора; б) по скорости вращения ротора; в) по методике стабилизации магнитного состояния стали ротора для перехода к несимметричному частному циклу перемагничивания стали ротора близкому к линейной части спадающей ветви предельного гистерезисного цикла при малых напряженностях магнитного поля;

3) при оценке состояния бандажных узлов ротора рекомендуется использовать меры сходства образов состояния ротора, использующие евклидово расстояние и внутримножественное расстояние.

Основная задача диагностирования состояния бандажных колец ротора в условиях эксплуатации турбогенератора состоит в количественном оценивании интенсивности изменения мер сходства измеряемого вектора признаков состояния ротора с его эталонным значением с целью своевременного обнаружения процесса развития дефектов, связанных с возникновением усталостных трещин и коррозионного растрескивания бандажных колец.

При построении диагностической матрицы контроля состояния бандажных колец в условиях эксплуатации турбогенератора следует учитывать возможные тепловые состояния ротора. Векторы эталонных образов ротора в этом случае должны определяться для условий режима пуска энергоблока (холодный ротор) и останова блока (горячий ротор).

При диагностировании повреждений бандажных колец ротора в условиях эксплуатации следует использовать эталонные диагностические характеристики Y_{l3} , полученные при вводе в эксплуатацию турбогенераторов. При частоте вращения валопровода генератор-турбина менее первой критической (500-1000 об/мин), и номинальной $Y_l (l = 0, 1, 2, \dots)$ в качестве критерия работоспособности бандажных колец, проверяемого после l -того периодического измерения, целесообразно принять неравенство:

$$D_l^2(Y_l, Y_{l3}) > k D_o^2(Y_o, Y_{o3}),$$

где k - коэффициент запаса (в пределах 1,2 - 1,5), уточняемый по мере накопления объема опытных данных (на это указывает индекс o в правой части неравенства) при нестабильности эталонной характеристики.

При оценке результатов текущих измерений следует также учитывать влияние таких коррелированных факторов, как наличие вибрации ротора, теплового перекоса ротора и ряда других.

Предлагаемый метод контроля состояния бандажных колец целесообразно использовать во время периодических режимных и плановых остановов энергоблоков. Очевидно, что регистрация импульсных переходных функций массива ротора в этом случае исключает необходимость применения традиционного метода контроля виткового замыкания в обмотке возбуждения по данным измерения импеданса ротора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка научных основ и промышленной методики диагностики состояния механических сопряжений конструктивных элементов ротора турбогенератора: Отчет о НИР (заключит.) / Донецк. госуд. техн. университет.; Руководитель Г.Г. Рогозин. - Г16 - 93; НГР0193U033334. - Донецк, 1995. - 87 с.
2. Rogozin G.G. & Kovjazin V.A. Express-method for monitoring the state of turbogenerator rotor end bells // 3-rd International Conference on Quality, Reliability and Maintenance: Conference Proceedings. 30 - 31 March 2000. - Oxford, England. - pp. 167 - 170.