

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ В ПРОЦЕССЕ СБОРКИ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТГВ-200М

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

Донецкий национальный технический университет
rgg@elf.dgtu.donetsk.ua

The present paper dealt with the full-scale investigation in the rotor testing of the turbogenerator (rated value 241.3 MVA) having been carried out by the use of the impulse signals being applied to the rotor slip rings at the manufacturer conditions. The new results offer a clearer view of how the separate stages of the rotor assembling at the sequence mounting of the rotor slot wedges system and the rotor end bells, as well as the rotor speed influence on the output diagnostics signals reflecting the damping characteristics of the eddy currents transient functions of the rotor constructional elements.

Одна из наиболее важных проблем повышения уровня надежности турбогенераторов связана с обеспечением контроля состояния массивных элементов конструкции ротора (ЭКР), не выявленные дефекты которых могут приводить к тяжёлым авариям. Основная задача диагностирования ЭКР в условиях производства и эксплуатации турбогенераторов состоит в количественном оценивании интенсивности изменения мер сходства измеряемого вектора признаков состояния ротора с его эталонным значением с целью своевременного обнаружения процесса развития дефектов.

Настоящая работа ставит своей целью:

а) проведение анализа импульсных переходных функций вихревых токов в ЭКР, которые были получены в эксперименте, выполненном на роторе турбогенератора ТГВ-200М в процессе его сборки на заводе-изготовителе;

б) определение границ между классами, характеризующими векторы признаков состояния ротора, с использованием положений теории распознавания образов.

Физическое моделирование качества механических сопряжений массивных ЭКР осуществлялось путем изменения количества клиньев в пазах ротора, проведения опытов в процессе последовательной установки бандажных колец и испытаний вращающегося с различной частотой ротора.

При проведении исследований использовался лабораторный макет комплекса средств измерений, для которого были рассчитаны метрологические характеристики, подтверждающие, что комплекс удовлетворяет требованию по точности регистрации начальной стадии изменения переходной функции затухающего тока в обмотке возбуждения ротора турбогенератора.

Регистрация диагностического сигнала проводилась в процессе сборки ротора на этапах проведения технологических операций по монтажу клиновой системы, после установки первого бандажа (расположенного со стороны противоположной кольцам ротора) и после установки второго бандажа.

При выполнении технологической операции по установке клиньев и бандажных колец в качестве эталонного образца был принят ротор в сборе (при двух установленных бандажах).

Время наблюдения каждой импульсной переходной функции принималось равным времени снижения эталонной характеристики до 0,2 д.е. Регистрация диагностического сигнала на кольцах ротора осуществлялась через интервалы времени, равные 100 мкс. Величина постоянного тока в обмотке возбуждения при формировании воздействующего сигнала, при напряжении 15 В, составляла 10 А. Выход на стабильный участок начальной кривой первоначального намагничивания обеспечивался 5 - 7 кратной подачей тестового воздействия на ранее не подвергавшийся намагничиванию массив ротора после завершения технологических операций по укладке, пайке и опрессовке катушек ротора.

Испытания ротора на оборотах проводились согласно плану, предусмотренному заводом-изготовителем, при вращении ротора с частотой 1000, 2000 и 3000 об/мин. В качестве эталонного образа была принята импульсная переходная функция ротора, вращающегося с частотой 3000 об/мин.

Измеренные на кольцах ротора значения электродвижущей силы взаимоиנדукции, пропорциональные производной переходной функции вихревых токов в элементах конструкции ротора, наведенных импульсным диагностическим воздействием в обмотке ротора, аппроксимировались суммой экспоненциальных составляющих:

$$u_f(t) = \sum_{k=1}^n u_{fk} \exp(-\alpha_{Dk} t),$$

где u_{fk} , α_{Dk} - начальное значение и коэффициент затухания k -той экспоненциальной составляющей.

Начальные значения электродвижущей силы, регистрируемые через каждые 100 мкс с помощью лабораторного макета автоматизированного комплекса средств измерений, содержащего 10 – ти разрядный аналого-цифровой преобразователь, нормировались исходя из условия:

$$\sum_{k=1}^n U_{fk} = 1.$$

Аппроксимация диагностических сигналов осуществлялась при следующих допущениях:

- переходная функция токов в массивных элементах конструкции ротора может быть представлена в виде реакции системы третьего порядка, что подтверждается параметрами разложения переходной функции анализатором линий CurveExpert_1.34;

- ординаты переходной функции после снижения сигнала до 0,2 – 0,3 начального значения принадлежат одной экспоненте, имеющей наибольшую постоянную времени.

В результате аппроксимации определялись параметры экспоненциальных составляющих переходных функций, которые в дальнейшем использовались для количественной оценки степени различий, соответствующих отдельным этапам сборки ротора и различным частотам вращения последнего.

Проверка однородности результатов параллельных опытов (выявление грубых ошибок) производилась по «Правилам оценки аномальности результатов наблюдений» (СТ 545 - 77). Методика решения этой задачи сводится к определению соответствующего доверительного интервала при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Результаты аппроксимации экспериментальных переходных функций ротора турбогенератора, отражающие отдельные характерные стадии процесса сборки, а именно, установка клиньев и бандажных колец, приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Параметры аппроксимации импульсных переходных функций ротора в процессе установки клиньев и бандажных колец

Этапы сборки ротора и характеристики их завершенности	Начальное значение экспоненциальной составляющей ЭДС, u_{fk} , д.е.			Постоянная времени $\tau_{Dk}=1/\alpha_{Dk}$, с		
	1	2	3	1	2	3
	вентиляционные клинья, 14,3 %	0,103	0,700	0,197	0,229	0,025
три ряда клиньев, 35,7 %	0,094	0,730	0,175	0,250	0,029	0,0039
восемь рядов клиньев, 71,4 %	0,093	0,725	0,182	0,256	0,030	0,0045
двенадцать рядов клиньев, 100 %	0,093	0,740	0,167	0,268	0,031	0,0051
первое бандажное кольцо	0,098	0,672	0,230	0,288	0,033	0,0066
второе бандажное кольцо	0,091	0,620	0,289	0,427	0,046	0,0074

Из анализа приведенных данных следует, что постоянные времени экспоненциальных составляющих по мере увеличения числа установленных клиньев и бандажных колец возросли в среднем на 47%. Начальные значения экспоненциальных составляющих изменяются незначительно в сторону увеличения доли быстрозатухающей составляющей.

Результаты аппроксимации опытных переходных функций вихревых токов экспоненциальным рядом и расчета соответствующих начальных значений экспоненциальных составляющих тока в массиве ротора при различных значениях частоты вращения последнего приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Параметры аппроксимации переходных функций вращающегося ротора

Частота вращения ротора, об./мин.	Начальное значение экспоненциальной составляющей ЭДС, u_{fk} , д.е.			Постоянная времени $\tau_{Dk}=1/\alpha_{Dk}$, с		
	1	2	3	1	2	3
	0	0,092	0,734	0,174	0,268	0,031
1000	0,088	0,676	0,236	0,289	0,034	0,0096
2000	0,089	0,617	0,293	0,277	0,031	0,0083
3000	0,105	0,658	0,237	0,242	0,030	0,0055

Из анализа приведенных данных следует, что постоянные времени экспоненциальных составляющих при увеличении частоты вращения ротора от 0 об./мин. до 1000 об./мин. возросли. Первые две - в среднем на 12%, а третья на 70%. При дальнейшем увеличении частоты вращения ротора до 3000 об./мин. постоянные времени уменьшаются до исходных значений, то есть не вращающийся ротор и вращающийся с частотой 3000 об./мин. имеют практически одинаковые постоянные времени экспоненциальных составляющих импульсных переходных функций. Указанное явление может быть объяснено физически тем, что с увеличением частоты вращения, при возрастании центробежных сил, вначале клинья, как более подвижные элементы конструкции ротора, сильнее прижимаются к бочке, уменьшая их контактное сопротивление (увеличиваются постоянные времени экспоненциальных составляющих). Затем, при значительном возрастании частоты вращения, бандажные кольца уменьшают натяг в месте их посадки, увеличивая контактное сопротивление (постоянные времени уменьшаются и возвращаются к исходным значениям). Начальные значения экспоненциальных составляющих при этом изменяются незначительно.

Анализ диагностических сигналов включал в себя, в качестве меры сходства образов состояния клиновой системы, бандажных колец и вращающегося ротора, M решающих функций $d(x)$, обладающих тем свойством, что при принадлежности некоторого образа (вектора) x i -му классу выполняется неравенство:

$$d_i(x) > d_j(x), \quad j \neq i.$$

Решение задачи о разделении на классы эквивалентно решению системы линейных неравенств. Решение этой системы ищется в виде вектора весов w , определяющего границы между классами. Искомые границы между классами, в конечном итоге, являются критериями классификации неисправностей элементов конструкции массивного ротора турбогенератора.

Уравнение поверхности, обеспечивающей разделение классов ω_i и ω_j , в общем виде задается так:

$$d_{i,j}(x) = d_i(x) - d_j(x) = (w_{i1} - w_{j1})x_1 + (w_{i2} - w_{j2})x_2 + \dots + (w_{in} - w_{jn})x_n + (w_{i,n+1} - w_{j,n+1}) = 0.$$

Для определения количества кластеров, выделяющихся в исходных данных, использовался алгоритм, основанный на максимальном (максимально-минимальном) расстоянии. Этот алгоритм представляет собой эвристическую процедуру, использующую евклидово расстояние.

Границы между классами определялись при помощи одного из разновидностей перцептронного подхода, а именно, алгоритма фиксированного приращения. Этот алгоритм вносит изменения в искомый вектор весов w , в том и только том случае, если образ, предъявленный на k -м шаге итерации, был при выполнении этого шага неправильно классифицирован с помощью соответствующего вектора весов. В алгоритме фиксированного приращения корректирующее приращение c является положительной константой. При определении границ между классами в случае процесса пооперационной сборки ротора фиксированное приращение принималось равным $c = 0,001$, а в случае испытаний ротора на оборотах - $c = 0,01$.

Алгоритм определения M решающих функций и, соответственно, границ между выделенными классами реализован программными средствами математической системы MathCad_7, разработанной фирмой MathSoft Inc.

На основании решающих функций определены границы между классами в виде линейных уравнений. Коэффициенты при компонентах вектора образа и свободные члены в табл. 3 и 4.

Таблица 3 – Коэффициенты и свободные члены в уравнениях границ вращающегося ротора

Частота вращения ротора, об./мин.	Номер уравнения	Номер коэффициента						Свободный член
		1	2	3	4	5	6	
0 и 3000	1	-0,101	3,688	-1,017	29,298	-0,234	-6,731	-1,35
	2	-0,049	2,377	-0,191	27,764	-0,535	-6,259	-0,78
1000	1	0,101	-3,688	1,017	-29,298	0,234	6,731	1,35
	2	0,051	-1,31	0,827	-1,534	-0,301	0,472	0,57
2000	1	0,049	-2,377	0,191	-27,764	0,535	6,259	0,78
	2	-0,051	1,31	-0,827	1,534	0,301	-0,472	-0,57

Аналогичным образом получены уравнения границ между классами, которые определяют этапы сборки ротора турбогенератора.

Критерием вхождения образа (опытной импульсной переходной функции разложенной на экспоненциальные составляющие) в определенный класс является выполнение условия положительности результата при решении систем уравнений границ.

Таблица 4 – Коэффициенты и свободные члены в уравнениях границ при сборке ротора

Этапы сборки ротора и характеристика их завершенности	Номер уравнения	Номер коэффициента						Свободный член
		1	2	3	4	5	6	
вентиляционные клинья, 14,3 %	1	- 1,43	28,103	- 25,323	- 43,402	- 3,949	5,489	- 30,834
	2	- 1,175	48,171	- 24,302	- 16,785	- 3,156	1,435	- 28,691
	3	0,534	36,387	- 15,925	0,767	8,234	- 0,816	- 7,221
	4	- 0,314	28,305	- 8,574	9,964	0,0585	- 2,244	- 8,895
	5	- 3,132	6,651	- 25,88	6,037	- 16,065	- 1,437	- 45,142
три ряда клиньев, 35,7 %	1	1,43	- 28,103	25,323	43,402	3,949	- 5,489	30,834
	2	0,255	20,068	1,021	26,618	0,793	- 4,053	2,143
	3	1,965	8,285	9,398	44,169	12,183	- 6,305	23,613
	4	1,116	0,202	16,749	53,366	4,008	- 7,732	21,939
	5	- 1,702	- 21,451	- 0,557	49,439	- 12,115	- 6,926	- 14,308
восемь рядов клиньев, 71,4 %	1	1,175	- 48,171	24,302	16,785	3,156	- 1,435	28,691
	2	- 0,255	- 20,068	- 1,021	- 26,618	- 0,793	4,053	- 2,143
	3	1,71	- 11,784	8,377	17,552	11,39	- 2,252	21,47
	4	0,861	- 19,866	15,728	26,749	3,215	- 3,679	19,796
	5	- 1,957	- 41,519	- 1,578	22,822	- 1,909	- 2,873	- 16,451
двенадцать рядов клиньев, 100 %	1	- 0,534	- 36,387	15,925	- 0,767	- 8,234	0,816	7,221
	2	- 1,965	- 8,285	- 9,398	- 44,169	- 12,183	6,305	- 23,613
	3	- 1,71	11,784	- 8,377	- 17,552	- 11,39	2,252	- 21,47
	4	- 0,849	- 8,083	7,351	9,197	- 8,176	- 1,428	- 1,674
	5	- 3,667	- 29,736	- 9,955	5,27	- 24,299	- 0,621	- 37,921
первое бандажное кольцо	1	0,314	- 28,305	8,574	- 9,964	- 0,0585	2,244	8,895
	2	- 1,116	- 0,202	- 16,749	- 53,366	- 4,008	7,732	- 21,939
	3	- 0,861	19,866	- 15,728	- 26,749	- 3,215	3,679	- 19,796
	4	0,849	8,083	- 7,351	- 9,197	8,176	1,428	1,674
	5	- 2,818	- 21,653	- 17,306	- 3,927	- 16,123	0,807	- 36,247
второе бандажное кольцо	1	3,132	- 6,651	25,88	- 6,037	16,065	1,437	45,142
	2	1,702	21,451	0,557	- 49,439	12,115	6,926	14,308
	3	1,957	41,519	1,578	- 22,822	12,909	2,873	16,451
	4	3,667	29,736	9,955	- 5,27	24,299	0,621	37,921
	5	2,818	21,653	17,306	3,927	16,123	- 0,807	36,247

Полученные, в результате обработки исходных импульсных переходных функций вихревых токов, границы, разделяющие классы, а именно их коэффициенты в виде векторов весов являются основой для создания автоматической системы распознавания неисправностей массивных элементов конструкции ротора турбогенераторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogozin, G.G., & Kovjazin, V.A., Express-method for monitoring the state of turbogenerator rotor end bells. *Proc. of the 3rd Intl. Conference on Quality, Reliability & Maintenance*. Oxford, UK, 167 – 170 (2000).
2. Tou, J.T. & Gonzalez, R.C., *Pattern recognition principles*. London and Amsterdam Addison – Wesley Publishing Company (1974).