

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ, ОТОБРАЖАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ НЕСИММЕТРИЮ ИХ МАССИВНЫХ РОТОРОВ

Ларин А.М., Ламари Абдельсалам

Донецкий государственный технический университет

r504a@scita.dn.ua

The paper is dealt with the possibility of determining the frequency response characteristics which represent the half-sum and half-difference of the complex admittances on the d-q axes of the synchronous machine using its equivalent circuits. The results are given about calculating the quantities of the mentioned equivalent circuits for some turbogenerators at different state of their field windings.

Наиболее характерной проблемой математического моделирования является противоречие между необходимостью учета большого количества действующих в исследуемых системах факторов и необходимостью быстрого и точного получения решения.

Основные цели, к достижению которых необходимо стремиться при развитии методов моделирования сложных систем, и в частности синхронных машин (СМ), состоят в сокращении количества операций на ЭВМ, сокращении объема оперативной памяти, уменьшении трудозатрат при подготовке и реализации задач на ЭВМ.

В этой связи задача, совершенствования математических моделей СМ с целью их упрощения без снижения точности является актуальной.

Широкое распространение в инженерной практике исследования динамических режимов электрических машин переменного тока (ЭМ) получили частотные методы. Они обладают большой простотой и наглядностью, а также позволяют непосредственно использовать для расчета экспериментальные данные в виде частотных характеристик отдельных элементов. В [1] предложены графо-аналитические способы исследования динамических режимов ЭМ, основанные на связи переходных процессов с частотными характеристиками. Упомянутые методы пригодны как для анализа электромагнитных, так и электромеханических процессов, сопровождающихся изменениями скорости вращения.

Для исследования процессов в турбогенераторах (ТГ), имеющих несимметричную конструкцию роторов, необходимо исходить из частотных характеристик проводимостей статора по продольной и поперечной осям $Y_d(js)$ и $Y_q(js)$, учитывающих наличие большого количества контуров на роторе.

В соответствии с [1] изображающий вектор тока статора невозбужденной СМ, вращающейся со скольжением s при номинальном напряжении на выводах обмотки статора, определяется выражением

$$\frac{1}{j} [Y_{cp}(js) + \Delta Y(-js) \cdot e^{-j2(st+\delta_0)}], \quad (1)$$

где δ_0 - угол, характеризующий начальное положение поперечной оси ротора по отношению к вектору напряжения статора.

Первая составляющая выражения (1) представляет собой амплитудно-фазочастотную характеристику проводимости СМ, которая характеризует изменение модуля и фазы вектора среднего тока статора:

$$Y_{cp}(js) = \frac{1}{2} (Y_d(js) + Y_q(js)). \quad (2)$$

Вторая составляющая, отражающая различие электромагнитных свойств по осям d и q ротора, определяет пульсацию изображающего вектора тока:

$$\Delta Y(js) = \frac{1}{2} (Y_d(js) - Y_q(js)). \quad (3)$$

Необходимым условием для реализации на ЭВМ предложенного в [1] графического подхода к моделированию переходных процессов является аналитическое описание частотных характеристик, заданных дискретно, и знание закона изменения во времени свободной составляющей периодического тока статора, возникающего в начальный момент нарушения режима.

Целью настоящей работы является разработка методики определения частотных характеристик, представляющих собой полусумму ($Y_{cp}(js)$) и полуразность ($\Delta Y(js)$) комплексных проводимостей по осям магнитной симметрии роторов турбогенераторов на основе их эквивалентных схем замещения.

При анализе электромеханических переходных процессов определение частотных характеристик $Y_d(js)$ и $Y_q(js)$ целесообразно производить по параметрам схем замещения, представляющих параллельное включение синхронного индуктивного сопротивления и эквивалентных сопротивлений контуров, расположенных по соответствующей оси ротора. Схема замещения такого вида для продольной оси показана на

рис.1. Параметры указанных схем замещения определяют также начальные значения и коэффициенты затухания экспоненциальных составляющих свободного периодического тока статора в переходном режиме

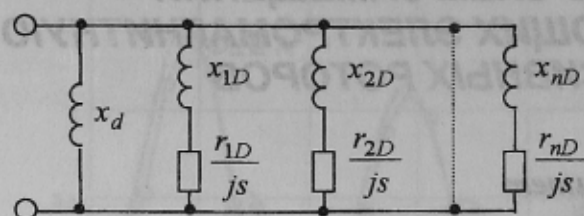


Рисунок 1 - Схема замещения СМ (ось d)

при короткозамкнутом состоянии обмотки статора и внезапном изменении напряжения на его выводах. Принятая в работе структура схем замещения для входных проводимостей со стороны обмотки статора позволяет представить эквивалентные схемы, соответствующие частотным характеристикам проводимостей $Y_{cp}(js)$ и $\Delta Y(js)$, в виде параллельно включенных схем для продольной и поперечной осей. Значения всех сопротивлений при этом должны быть увеличены в два

раза. Тогда выражение для определения характеристики $Y_{cp}(js)$ будет иметь следующий вид

$$Y_{cp}(js) = \frac{1}{2x_d} + \frac{1}{2x_q} + \sum_{k=1}^M \frac{js}{2r_{kD} + js \cdot 2x_{kD}} + \sum_{l=1}^N \frac{js}{2r_{lQ} + js \cdot 2x_{lQ}}, \quad (4)$$

где M, N - количество контуров схем замещения по осям d и q соответственно.

Частотная характеристика $\Delta Y(js)$ будет определяться выражением аналогичным (4) после изменения знаков перед параметрами, соответствующими схеме замещения по поперечной оси на противоположные.

Таким образом, частотные характеристики $Y_{cp}(js)$ и $\Delta Y(js)$ представляются схемами замещения, с числом контуров, равным сумме контуров схем замещения по продольной и поперечной осям. Необходимость учета такого большого количества целей значительно усложняет математическую модель и увеличивает время расчета на ЭВМ. Возникает задача упрощения схем за счет их эквивалентирования. Непосредственное определение параметров упрощенной схемы замещения путем расчета эквивалентных сопротивлений параллельно включенных контуров затруднительно из-за различных их спектральных характеристик.

Наличие в схемах для различных осей симметрии ротора контуров с одинаковыми или близкими по величине электромагнитными постоянными времени позволяет заменить их одним эквивалентным. Пусть в схеме замещения по оси q имеется l -тый контур активное и индуктивное сопротивления которого отличаются соответственно от активного и индуктивного сопротивлений k -го контура схемы по продольной оси в K раз. Тогда для полусуммы проводимостей этих контуров можно записать

$$\frac{1}{2} \left[\frac{js}{r_{kD} + jsx_{kD}} + \frac{1}{K} \cdot \frac{js}{r_{lQ} + jsx_{lQ}} \right] = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{K} \right) \frac{js}{r_{kD} + jsx_{kD}} = \frac{K+1}{2K} \cdot \frac{js}{r_{kD} + jsx_{kD}}. \quad (5)$$

Правая часть выражения (5) указывает на то, что два контура с одинаковыми постоянными времени можно заменить одним. Активное и индуктивное сопротивления эквивалентного контура должны быть изменены по

сравнению с k -тым контуром в схеме по оси d в $\frac{2K}{K+1}$ раз. Это позволяет сократить число контуров в схемах замещения, соответствующих проводимостям $Y_{cp}(js)$ и $\Delta Y(js)$ без внесения каких-либо погрешностей.

В общем случае эквивалентирование должно основываться на алгоритмах, которые позволяют по частотным характеристикам входных проводимостей или сопротивлений, учитывающих влияние большого количества контуров, определять параметры схем замещения, содержащих любое меньшее число эквивалентных роторных контуров. Подобные алгоритмы предложены в [2,3]. Их применение позволяет определить значения индуктивных ($x_{kcp}, \Delta x_k$) и активных ($r_{kcp}, \Delta r_k$) сопротивлений схем замещения, по экспериментальным частотным характеристикам $Y_{cp}(js)$ и $\Delta Y(js)$, по (2) и (3) и содержащих заданное количество контуров (m и n соответственно). Тогда расчетные частотные характеристики будут определяться следующим образом:

$$Y_{cp}(js) = Y_{cp}(0) + \sum_{k=1}^m \frac{js}{r_{kcp} + jsx_{kcp}}, \quad m < M + N, \quad (6)$$

$$\Delta Y(js) = \Delta Y(0) + \sum_{l=1}^n \frac{js}{\Delta r_l + js\Delta x_l}, \quad n < M + N, \quad (7)$$

где $Y_{cp}(0) = \frac{x_d + x_q}{2x_d x_q}, \quad \Delta Y(0) = -\frac{x_d - x_q}{2x_d x_q}.$

Эффективность предложенной методики определения частотных характеристик $Y_{cp}(js)$ и $\Delta Y(js)$ оценивалась путем исследования электромагнитных параметров ТГ различных мощностей и типов. В

качестве примера в табл.1 приведены параметры схем замещения общепринятого вида для ТГ ТГВ-200, содержащих по пять контуров в каждой оси ротора.

Частотные характеристики $Y_{cp}(js)$ и $\Delta Y(js)$, рассчитанные по (2) и (3) на основании частотных характеристик $Y_d(js)$ и $Y_q(js)$, показаны на рис. 2 (кривые 1 и 4 соответственно).

Параметры многоконтурных схем замещения, структуры, приведенной на рис. 1, полученные по методике [2], указаны в табл. 2. Число контуров принималось равным пяти для каждой из определяемых схем. При этом частотные характеристики $Y_{cp}(js)$ и $\Delta Y(js)$, рассчитанные по данным табл.2 согласно (6) и (7) соответственно, практически совпали с соответствующими зависимостями, определенными по экспериментальным характеристикам (погрешность не превышает 0,5% для действительных и мнимых составляющих во всем диапазоне скольжений).

Таблица 1 - Параметры схем замещения турбогенератора ТГВ-200 общепринятого типа ($x_{\sigma} = 0,175$; $x_{ad} = x_{aq} = 1,724$)

Номер контура	Частотная характеристика			
	$Y_d(js)$		$Y_q(js)$	
	$x_{\sigma kd}$	r_{kd}	$x_{\sigma kq}$	r_{kq}
1	274,00	0,0106	5,4623	0,0052
2	2,8100	0,0015	2,2013	0,0125
3	0,1860	0,0008	0,5777	0,0185
4	0,6780	0,0483	0,3084	0,0434
5	0,0444	0,0822	0,0563	0,1032

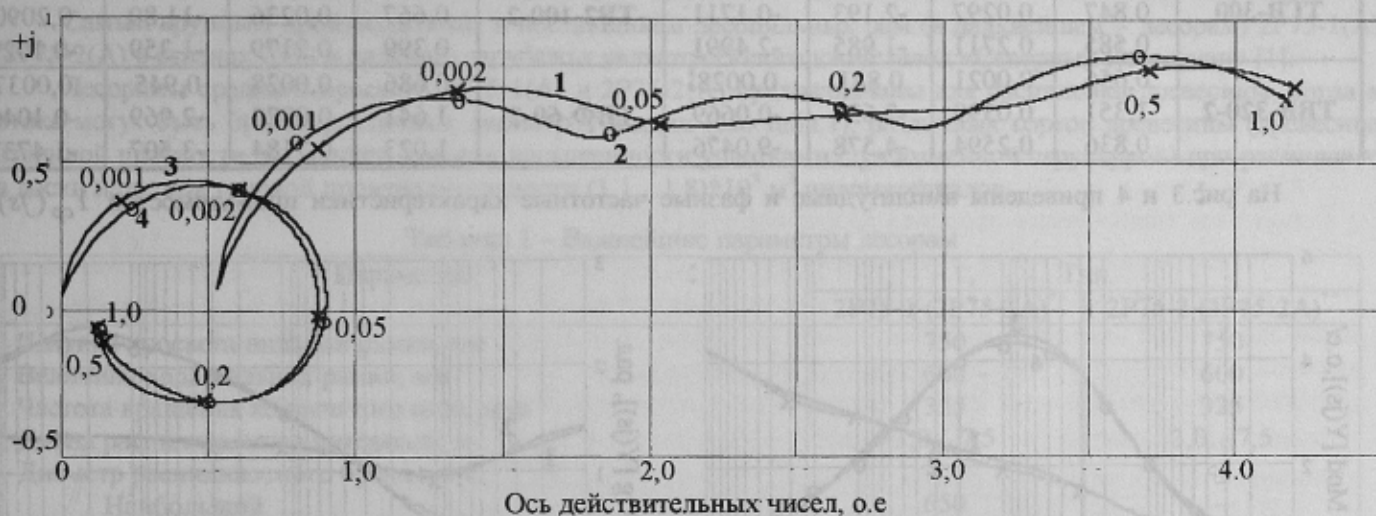


Рисунок 2 - Частотные характеристики турбогенератора ТГВ-200

Таблица 2 - Параметры схем замещения (рис. 1) турбогенератора ТГВ-200

Номер контура	Частотная характеристика							
	$Y_d(js)$		$Y_q(js)$		$Y_{cp}(js)$		$\Delta Y(js)$	
	x_{kd}	r_{kd}	x_{kq}	r_{kq}	x_{kcp}	r_{kcp}	Δx_k	Δr_k
1	8,557	0,0026	6,417	0,0059	3,568	0,0024	10,36	0,0037
2	2,656	0,0023	2,649	0,0140	0,853	0,0023	1,061	0,0024
3	0,493	0,0013	0,896	0,0222	1,699	0,0354	-1,919	-0,0403
4	3,298	0,2270	0,995	0,1010	1,448	0,1292	-2,471	-0,2258
5	0,686	0,4832	0,698	0,5330	0,686	0,5028	54,78	-60,270

Выполненные для ряда ТГ исследования показали, что частотные характеристики $Y_{cp}(js)$ и $\Delta Y(js)$ могут быть аналитически описаны с помощью эквивалентных схем замещения, содержащих по пять контуров, с погрешностью не более 0,5 %.

Рассмотрим возможность дальнейшего уменьшения количества контуров в схемах замещения, отображающих электромагнитную несимметрию их роторов, при условии, что погрешности в определении среднего тока статора и сго пульсирующей составляющей не превысят 10 -12 %. В табл.3 приведены значения параметров трехконтурных схем замещения для ряда турбогенераторов различной мощности и типов.

Частотные характеристики $Y_{cp}(js)$ и $\Delta Y(js)$ для ТГ ТГВ-200, рассчитанные в соответствии с (6) и (7) по параметрам схем замещения, приведенным в табл.3, (рис.2, кривые 2 и 3 соответственно), отличаются от найденных по экспериментальным зависимостям не более чем на 13,6 % для действительных составляющих частотных характеристик. Для мнимых составляющих погрешность увеличивается до 22,8 %. Для других исследованных турбогенераторов погрешность не превысила указанные величины. Однако, поскольку

характеристики $Y_{cp}(js)$ и $\Delta Y(js)$ необходимы для вычисления модулей и фаз векторов среднего тока и его пульсирующей составляющей, то целесообразно оценивать погрешность именно для указанных параметров.

Таблица 3-Параметры трехконтурных схем замещения (рис. 1) для различных турбогенераторов

Тип турбогенера- тора	Частотная характеристика				Тип турбогенера- тора	Частотная характеристика			
	$Y_{cp}(js)$		$\Delta Y(js)$			$Y_{cp}(js)$		$\Delta Y(js)$	
	$x_{k\text{cp}}$	$r_{k\text{cp}}$	Δx_k	Δr_k		$x_{k\text{cp}}$	$r_{k\text{cp}}$	Δx_k	Δr_k
ТВВ-800-2	0,779	0,0024	1,075	0,0041	ТВВ-200-2	0,731	0,0021	1,061	0,0035
	0,964	0,0358	-1,613	-0,1367		1,237	0,0314	-2,454	-0,0836
	0,968	0,5027	2,678	8,4637		0,734	0,1969	-11,05	2,8680
ТВВ-500-2	0,805	0,0024	1,029	0,0029	ТГВ-200	0,78	0,0015	1,042	0,0020
	1,693	0,0764	-1,967	-0,0735		0,878	0,0268	-1,538	-0,0487
	1,196	0,5350	-3,845	-2,3000		0,622	0,3410	-5,193	-1,0000
ТГВ-500	0,972	0,0029	1,364	0,0041	ТВФ-120-2	0,593	0,0019	0,851	0,0031
	1,282	0,0375	-3,027	-0,0983		1,093	0,0376	-2,002	-0,0819
	0,653	0,3361	-3,003	-0,5468		0,932	0,3844	-2,040	-1,7520
ТГВ-300	0,709	0,0022	0,997	0,0032	ТВ2-100-2	0,471	0,0010	0,686	0,0011
	0,847	0,0297	-2,193	-0,1711		0,667	0,0236	-11,80	0,2090
	0,585	0,2711	-1,985	-2,4991		0,399	0,2179	-1,359	-0,1029
ТВВ-320-2	0,656	0,0021	0,841	0,0028	ТВФ-60-2	0,686	0,0028	0,945	0,0037
	1,351	0,0399	-2,634	-0,0669		1,641	0,0923	-2,969	-0,1046
	0,836	0,2594	-4,578	-9,0476		1,023	0,7184	-3,507	-1,4737

На рис.3 и 4 приведены амплитудные и фазные частотные характеристики проводимостей $Y_{cp}(js)$ и

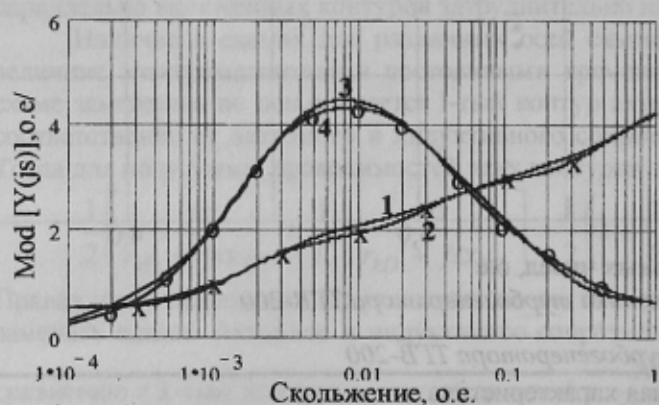


Рисунок 3-Амплитудные частотные характеристики ТГ типа ТГВ-200

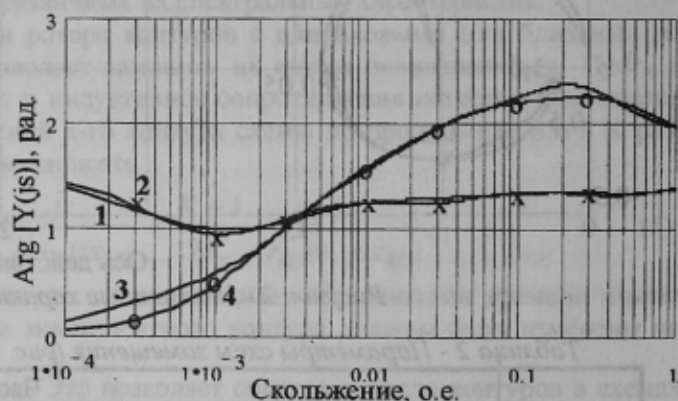


Рисунок 4-Фазные частотные характеристики ТГ типа ТГВ-200

$\Delta Y(js)$ ТГ ТГВ-200. На рисунках приняты следующие обозначения: 1- модуль и фаза частотной характеристики $Y_{cp}(js)$, рассчитанной по (2); 2 - то же по (6); 3 - модуль и фаза частотной характеристики $\Delta Y(js)$, рассчитанной по (3); 4 - то же по (7). Модули векторов характеристик $\Delta Y(js)$, рассчитанных по (3) и (7) на рис.3. увеличены в 5 раз.

Сопоставительный анализ исходных (кривые 1 и 3) и рассчитанных по параметрам трехконтурных схем замещения (кривые 2 и 4) амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик указывает на их удовлетворительное совпадение во всем диапазоне частот. Наибольшая погрешность, имеющая место для фаз векторов характеристик $\Delta Y(js)$ не превышает 11,2%.

Таким образом, предложенный в работе способ определения среднего значения и пульсирующей составляющей изображающего вектора тока статора позволяет в 2-3 раза сократить объем необходимых вычислений с погрешностью, не превышающей 10 - 12 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. -624 с.
2. Rogozin G.G., Larin A.M. Расчет параметров эквивалентных роторных контуров синхронных машин по их экспериментальным частотным характеристикам. - Электричество, 1974, № 6. С.10-13.
3. Larin A.M., Rogozin G.G. Синтез параметров эквивалентной схемы замещения массивного ротора турбогенератора градиентным методом. - Электричество, 1976, № 11. С.10-13.