

ОБОБЩЕННЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ МНОГОКОНТУРНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Ламари Абдессалем, Ларин А.М

Донецкий национальный технический университет

E-mail: lam@elf.dgtu.donetsk.ua

The original new approach is put forward for generalizing the turbogenerator experimental electromagnetic parameters represented both the frequency and time domain. Data are given about the standard quantities for the generalized equivalent L-circuit of the fourth order with the magnetizing arm brought out the terminals of the turbogenerator

Для уточненного исследования динамических режимов работы турбогенераторов используются многоконтурные схемы замещения. Такие схемы замещения могут быть синтезированы по экспериментальным частотным характеристикам (ч.х.) проводимостей со стороны обмотки статора $y_{d(q)}(js)$. В настоящее время имеются экспериментальные ч.х. ряда турбогенераторов, полученные различными методами. Их анализ и установленный характер закономерностей изменения эквивалентных активных и индуктивных сопротивлений контуров ротора указывает на возможность обобщения электромагнитных свойств турбогенераторов. На целесообразность такого обобщения указывалось в [1-3].

Определение типовых характеристик в виде отношения операторных полиномов [1] или типовых многоконтурных схем замещения [2] не обеспечивает достаточной точности описания ч.х. при скольжениях более 10%. При этом авторами усреднялись совокупности электромагнитных параметров только четырех турбогенераторов. В [3] рассматривается поход к определению параметров эквивалентных контуров схемы замещения ротора обобщенного турбогенератора, заключающийся в выражении искомых параметров соотношениями типа уравнений регрессии для двухмерного факторного пространства. Предложенный подход и использование в качестве исходных данных ч.х. шести турбогенераторов позволило повысить точность. В [1-3] анализировались ч.х. турбогенераторов, полученные экспериментально по данным опытов затухания постоянного тока. Аналогичная задача решалась в [4] для определения операторных сопротивлений обобщенного ротора из анализа ч.х. сопротивлений турбогенераторов, полученных методом гармонических воздействий.

Во всех рассмотренных случаях анализировались параметры Т-образных схем замещения (рис.1) общепринятого вида, предполагающих равенство магнитного потока взаимной индукции между всеми контурами, эквивалентирующими массивные конструктивные элементы для продольной и поперечной осей ротора при разомкнутом состоянии обмотки возбуждения генератора (ОВГ).

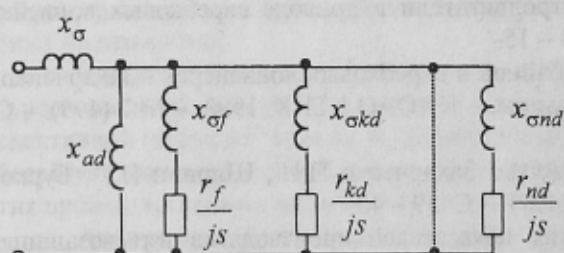


Рисунок 1 - Общепринятая схема замещения СМ по продольной оси (Т-образная)

описанными в [1-4] способами. Кроме того, использование параметров эквивалентных контуров ротора обобщенного турбогенератора, полученных по обеим осям при разомкнутой ОВГ, для моделирования электромагнитных переходных процессов с учетом влияния ОВГ вносит дополнительные погрешности. Это объясняется тем, что в опытах при короткозамкнутом состоянии ОВГ проявляется сильное экранирующее воздействие последней, вследствие чего динамические свойства массивного ротора проявляются иным образом, особенно в области малых скольжений.

Вместе с тем анализ переходных процессов можно производить непосредственно по ч.х. проводимостей синхронной машины (СМ) на основе установленной в [6] связи между составляющими изображающего вектора тока статора в переходном режиме и ч.х. В этом случае более эффективным [7] является аналитическое описание ч.х. с помощью Г-образных схем замещения с вынесенной ветвью намагничивания (рис.2). Параметры роторных контуров Г-образной схемы замещения определяют амплитуды и постоянные времени

Параметры указанных схем замещения определяют коэффициенты дифференциальных уравнений электромагнитного состояния типа уравнений Парка-Горева, используемых для исследования переходных процессов на ПЭВМ. При синтезе Т-образных схем замещение на значения эквивалентных параметров роторных контуров существенное влияние оказывает величина необходимого для расчетов индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора $x_σ$ [5]. Это приводит к дополнительным погрешностям при определении типовых параметров турбогенераторов,

соответствующих переходных составляющих аperiodического тока в роторных цепях при внезапном трехфазном коротком замыкании на выводах СМ (при неучете активного сопротивления обмотки статора).

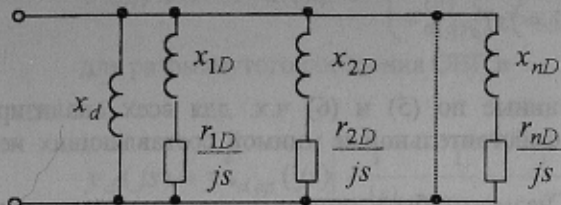


Рисунок 2 - Γ -образная схема замещения СМ с вынесенной ветвью намагничивания

В этой связи целесообразна постановка задачи обобщения частотных характеристик и получение типовых параметров адекватных эквивалентных схем замещения турбогенераторов с вынесенной ветвью намагничивания, отражающих динамические свойства массивных элементов ротора при разомкнутом и короткозамкнутом состояниях обмотки возбуждения.

Для решения поставленной задачи в настоящей работе предлагается подход, отличающийся возможностью учета известных значений синхронных

(x_d, x_q) и сверхпереходных ($x_d^{(n)}, x_q^{(n)}$) значений индуктивных сопротивлений турбогенератора конкретного типа. Это позволит с большей точностью отобразить динамические свойства конкретного турбогенератора одновременно как в области малых, так и больших скольжений.

Исходными данными для анализа явились ч.х. проводимостей со стороны обмотки статора двенадцати турбогенераторов мощностью от 12 до 800 МВт, полученные экспериментально по данным опытов затухания постоянного тока в обмотках статора по поперечной оси при разомкнутой ОВГ и продольной – для короткозамкнутого и разомкнутого состояний ОВГ.

Анализируются ч.х., представляющие собою комплексную проводимость роторных контуров Γ -образных схем замещения, построенных с использованием соотношений вида:

$$y_{d(q)}^*(js) = y_{d(q)}(js) - y_{d(q)}(js)_{s=0} = y_{d(q)}(js) - \frac{1}{x_{d(q)}} \quad (1)$$

для разомкнутого состояния ОВГ по поперечной и продольной осям магнитной симметрии ротора и

$$y_d^*(js) = y_d(js) - \frac{1}{x_d} - \frac{js \frac{1}{r_f}}{1 + jsT_d'} \quad (2)$$

по продольной оси для короткозамкнутого состояния ОВГ.

В (2) r_f, T_d' - активное сопротивление и электромагнитная постоянная времени ОВГ при короткозамкнутой обмотке статора, принимаются по справочным данным или данным заводских расчетных формуляров турбогенераторов.

Усреднению должны подлежать частотные характеристики, отнесенные, например, к своим комплексам, характеризующим неподвижное состояние машины $y_{d(q)}^*(j1)$. В соответствии с (1) и (2) выражения для соответствующих относительных частотных характеристик будут иметь вид:

$$y_{d(q)}^*(js) = \frac{y_{d(q)}^*(js)}{y_{d(q)}(j1) - \frac{1}{x_{d(q)}}} \quad (3)$$

$$y_{d(q)}^*(js) = \frac{y_{d(q)}^*(js)}{y_{d(q)}(j1) - \frac{1}{x_{d(q)}} - \frac{j1 \frac{1}{r_f}}{1 + j1T_d'}} \quad (4)$$

Пересчет полученных в соответствии с (3) и (4) обобщенных (средних) относительных ч.х. к частотным характеристикам проводимости со стороны обмотки статора турбогенератора конкретного типа может быть выполнен при использовании данных опытов питания неподвижной машины токами промышленной частоты и значений синхронных индуктивных сопротивлений для разомкнутого и короткозамкнутого состояний ОВГ по выражениям (5) и (6) соответственно:

$$y_{d(q)}(js) = y_{d(q)cp}^*(js) \left(y_{d(q)}(j1) - \frac{1}{x_{d(q)}} \right) + \frac{1}{x_{d(q)}} \quad (5)$$

$$y_d(js) = y_{*dcp}^*(js) \left(y_d(j1) - \frac{1}{x_d} - \frac{j1 \frac{1}{r_f}}{1 + j1T_d'} \right) + \frac{1}{x_d} + \frac{js \frac{1}{r_f}}{1 + jsT_d'} \quad (6)$$

Выполненные исследования показали, что рассчитанные по (5) и (6) ч.х. для всех анализируемых турбогенераторов отличаются от экспериментальных для действительной и мнимой составляющих не более чем на 23,4% в диапазоне скольжений от 0 до 10 о.е.

Однако, полученные по (4) и (5) обобщенные ч.х. не могут быть описаны аналитически с помощью эквивалентных схем замещения, так как при $s = 1$ мнимая составляющая этих характеристик равна нулю. Это затрудняет их практическое использование.

Целесообразно значения характеристик, рассчитываемых по (1) и (2) отнести к своим значениям, соответствующим скольжению $s = \infty$.

В этом случае выражение для относительных ч.х. при разомкнутом состоянии ОВГ, подлежащих усреднению имеет вид:

$$y_{*d(q)}^*(js) = \frac{y_{d(q)}^*(js)}{\frac{1}{x_{d(q)}^{(n)}} - \frac{1}{x_{d(q)}}} \quad (7)$$

Для экспериментальных данных, соответствующих короткозамкнутому состоянию ОВГ необходимо учитывать параметры обмотки возбуждения r_f и T_d' :

$$y_{*d}^*(js) = \frac{y_d^*(js)}{\frac{1}{x_d^{(n)}} - \frac{1}{x_d} - \frac{1}{r_f T_d'}} \quad (8)$$

Обобщенные относительные ч.х., полученные по (7) и (8) приведены на рис. 3.

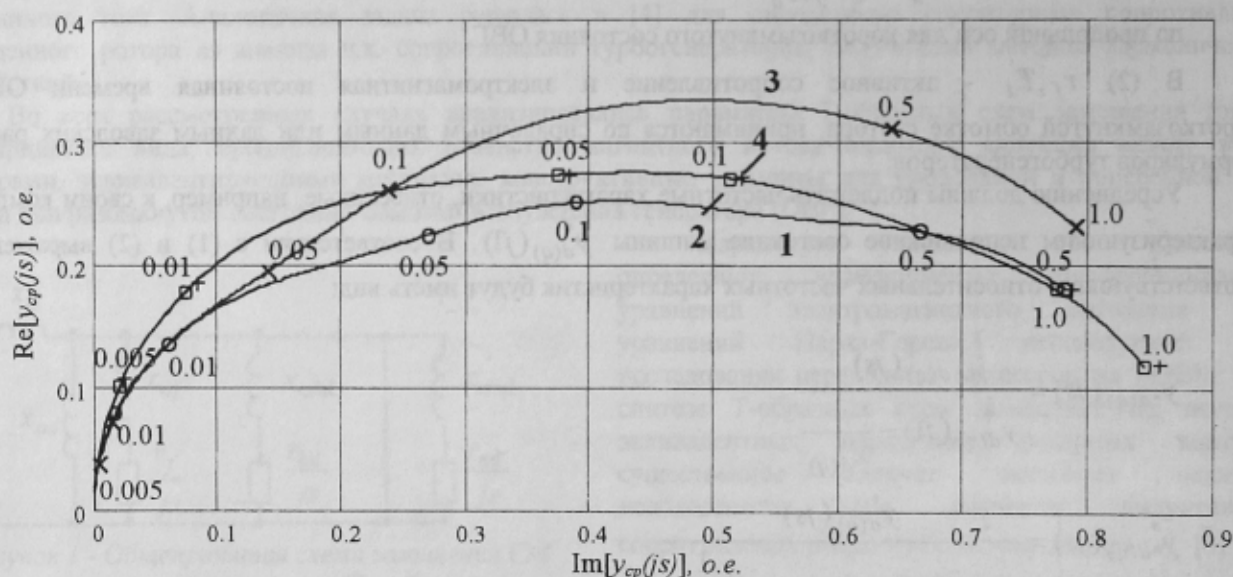


Рисунок 3 – Относительные обобщенные частотные характеристики турбогенераторов
1 – ось q ; 2,3,4 – ось d

Сопоставление средних относительных ч.х., отражающих динамические свойства эквивалентных демпферных контуров по продольной оси, полученных из частотных характеристик для разомкнутого и короткозамкнутого состояний ОВГ (кривые 2 и 3 соответственно), указывает на их существенное отличие. Несовпадение практически во всем диапазоне скольжений достигает 92%. Это свидетельствует о действительно имеющем место существенном экранирующем влиянии ОВГ.

По полученным значениям относительных обобщенных характеристик можно рассчитать частотные характеристики проводимости со стороны обмотки статора конкретного турбогенератора по следующим соотношениям:

$$y_{d(q)}(js) = y_{*d(q)cp}^*(js) \left(\frac{1}{x_{d(q)}^{(n)}} - \frac{1}{x_{d(q)}} \right) + \frac{1}{x_{d(q)}} \quad (9)$$

для разомкнутого состояния ОВГ и

$$y_d(js) = y_{*dcp}^*(js) \left(\frac{1}{x_d^{(n)}} - \frac{1}{x_d} - \frac{1}{r_f T_d'} \right) + \frac{1}{x_d} + \frac{js \frac{1}{r_f}}{1 + js T_d'} \quad (10)$$

для короткозамкнутой обмотки возбуждения.

Для практического использования полученных обобщенных относительных ч.х. удобнее иметь их аналитическое описание. Для этого по методике [8] были определены параметры роторных контуров Г-образных схем замещения, приведенные в таблице. Погрешность аппроксимации при четырех контурах не

Таблица - Обобщенные относительные параметры Г-образных схем замещения турбогенераторов

Параметры	Область обобщения			
	частотная			временная
	Ось d (ОВГ разомкнута)	Ось q (ОВГ разомкнута)	Ось d (ОВГ короткозамкнута)	Ось d (ОВГ разомкнута)
$\frac{x_1}{r_1}$	9,7800	10,889	11,547	9,8400
$\frac{x_2}{r_2}$	0,0282	0,0227	0,1461	0,0282
$\frac{x_3}{r_3}$	2,8490	4,3530	5,9910	2,8170
$\frac{x_4}{r_4}$	0,0564	0,0757	0,1948	0,0525
$\frac{x_3}{r_3}$	3,1440	3,0530	2,4180	3,0670
$\frac{x_4}{r_4}$	0,3008	0,3142	0,4982	0,2960
$\frac{x_4}{r_4}$	4,6150	3,1360	3,1450	4,6080
$\frac{x_4}{r_4}$	2,1141	1,9942	1,9869	2,1117

превысила 0,5 % во всех рассматриваемых случаях в диапазоне скольжений от 0 до ∞.

По приведенным в таблице параметрам обобщенных схем замещения (r_k, x_k) можно достаточно просто рассчитать параметры четырех контурных Г-образных схем замещения ($r_{kD(Q)}, x_{kD(Q)}$) и соответствующие им частотные характеристики проводимости со стороны обмотки статора турбогенератора конкретного типа, используя известные значения синхронных и сверхпереходных индуктивных сопротивлений. Действительно, из рис.2 и соотношений (7), (8) следует, что:

$$r_{kD(Q)} = \frac{r_k}{\frac{1}{x_{d(q)}^{(n)}} - \frac{1}{x_{d(q)}}}, \quad x_{kD(Q)} = \frac{x_k}{\frac{1}{x_{d(q)}^{(n)}} - \frac{1}{x_{d(q)}}} \quad (11)$$

для разомкнутого состояния ОВГ или

$$r_{kD(Q)} = \frac{r_k}{\frac{1}{x_{d(q)}^{(n)}} - \frac{1}{x_{d(q)}} - \frac{1}{r_f T_d'}}, \quad x_{kD(Q)} = \frac{x_k}{\frac{1}{x_{d(q)}^{(n)}} - \frac{1}{x_{d(q)}} - \frac{1}{r_f T_d'}} \quad (12)$$

для короткозамкнутого.

Используя полученные после этого параметры Г-образных схем замещения, можно определить частотные характеристики по обеим осям магнитной симметрии при разомкнутой обмотке возбуждения:

$$y_{d(q)}(js) = \frac{1}{x_{d(q)}} + \sum_{k=1}^n \frac{js}{r_{kD(Q)} + js x_{kD(Q)}} \quad (13)$$

Частотная характеристика по продольной оси, соответствующая короткозамкнутой ОВГ может быть получена путем параллельного подключения контура с параметрами r_f и T_d' :

$$y_d(js) = \frac{1}{x_d} + \sum_{k=1}^n \frac{js}{r_{kD} + js x_{kD}} + \frac{js}{r_f + js r_f T_d'} \quad (14)$$

Качество идентификации динамических свойств турбогенераторов с помощью обобщенных относительных схем замещения оценивалось путем сопоставления исходных и рассчитываемых с использованием выражений (13) и (14) ч.х. Несовпадения значений действительных и мнимых составляющих исходных и полученных для четырехконтурных схем замещения ч.х. не превышает 23,4% в области скольжений $0,1 < s < 10$ о.е.

В качестве примера, на рис.4 и 5 приведены ч.х. турбогенераторов типа ТГВ-200 и ТГВ-300 соответственно по продольной оси ротора при разомкнутой ОВГ. Для турбогенератора ТГВ-200 (рис.4, кривые 1 и 2) наибольшая погрешность достигает 23,4% по мнимой составляющей в зоне скольжений $0,1 < s < 10$ о.е. Для действительной составляющей в указанной области погрешность не превышает 8,7%. Для турбогенератора типа ТГВ-300 несовпадение действительных и мнимых составляющих в диапазоне скольжений $0,01 < s < 10$ о.е. не превышает 19,1%.

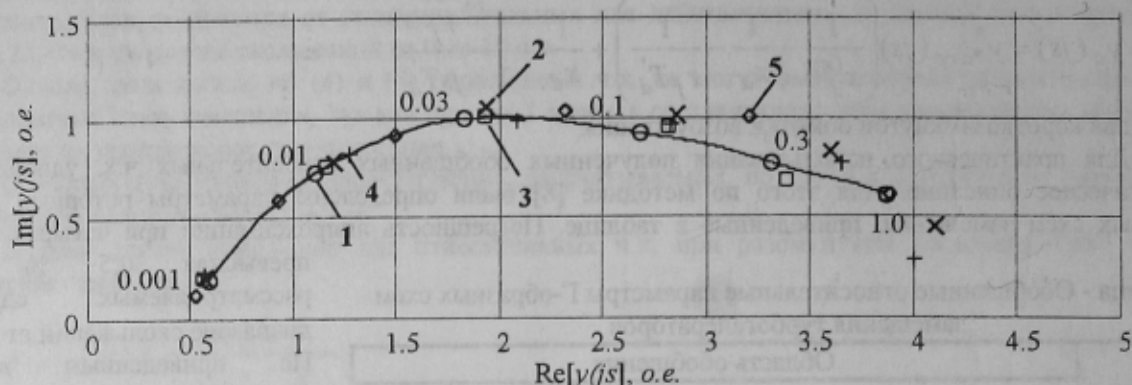


Рисунок 4 – Частотные характеристики турбогенератора ТГВ-200

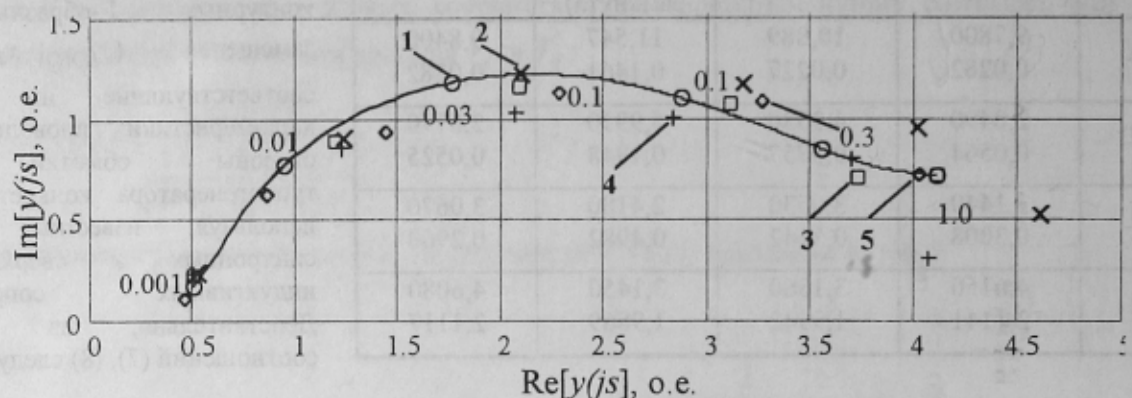


Рисунок 5 – Частотные характеристики турбогенератора ТГВ-300

Существенного снижения погрешностей в области скольжений $0,1 < s < 10$ о.е. можно достичь, если скорректировать параметры последнего четвертого контура, имеющего наименьшую постоянную времени, по известному комплексу частотной характеристики при $s = 1$. Последний может быть определен по данным опыта питания неподвижной машины током промышленной частоты.

Для уточнения активного и индуктивного сопротивлений четвертого контура ($r_{4D(Q)}, x_{4D(Q)}$) вначале рассчитывается его комплексная проводимость при скольжении $s = 1$:

$$y_4(js)_{s=1} = y_{d(q)}(js)_{s=1} - \frac{1}{x_{d(q)}} - \sum_{k=1}^3 \frac{j}{r_{kD(Q)} - jx_{kD(Q)}} \quad (15)$$

После этого уточняются параметры четвертого контура:

$$r_{4D(Q)} = \frac{\text{Im}[y_4(js)_{s=1}]}{|[y_4(js)_{s=1}]|^2}, \quad x_{4D(Q)} = \frac{\text{Re}[y_4(js)_{s=1}]}{|[y_4(js)_{s=1}]|^2} \quad (16)$$

Скорректированные подобным образом частотные характеристики турбогенераторов ТГВ-200 и ТГВ-300 приведены соответственно на рис.4 и 5 (кривые 3). Для турбогенератора ТГВ-200 погрешность в зоне скольжений $0,1 < s < 10$ о.е. снизилась до 11,7%, а для турбогенератора ТГВ-300 - до 8,5%.

На рис. 4 и 5 приведены также результаты расчета ч.х. по типовым параметрам, полученным в [2] и [3] (кривые 4 и 5 соответственно). Как следует из указанных рисунков погрешность определения ч.х. по методике [2] приводит к погрешностям, достигающим 19,1% и 37,1% в области скольжений $s < 0,01$ о.е. для турбогенераторов ТГВ-200 и ТГВ-300 соответственно. В области скольжений $s > 0,5$ о.е. несовпадение частотных характеристик составляет соответственно 52,3% и 57,3%.

Частотные характеристики, рассчитанные по данным [3], имеют погрешность не превышающую 10% в зоне скольжений $s > 0,5$ о.е. Однако при скольжениях $s < 0,1$ о.е. она превышает 30% для анализируемых турбогенераторов.

Приведенные сопоставительные результаты свидетельствуют об эффективности предлагаемой в работе методике обобщения электромагнитных параметров турбогенераторов.

Обобщение совокупности электромагнитных параметров возможно также производить во временной области. Для проверки этого по методике [8] были синтезированы Г-образные схемы замещения (рис.2) турбогенераторов по продольной оси ротора при разомкнутом состоянии ОВГ. По параметрам полученных схем замещения рассчитывались переходные функции:

$$i_{d(q)}^*(t) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{x_{kD(Q)}} e^{-t/\tau_{kD(Q)}} \quad (17)$$

где $\tau_{kD(Q)} = \frac{x_{kD(Q)}}{r_{kD(Q)}}$ - электромагнитная постоянная времени k -го контура схемы замещения.

Поскольку для Г - образной схемы замещения $x_{d(q)}^{(n)} = \frac{1}{\frac{1}{x_{d(q)}} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{x_{kD(Q)}}$, то переходные функции вида

(17), отнесенные к своим начальным значениям при $t=0$ будут определяться следующим образом:

$$i_{d(q)}^*(t) = \frac{i_{d(q)}^*(t)}{i_{d(q)}^*(0)} = \frac{i_{d(q)}^*(t)}{\frac{1}{x_{d(q)}^{(n)}} - \frac{1}{x_{d(q)}}} \quad (18)$$

Переходные функции, рассчитываемые по (18) для всех исследуемых турбогенераторов, усреднялись. Средняя переходная функция аппроксимировалась четырьмя экспоненциальными составляющими, по которым определялись параметры четырех контуров Г-образных схем замещения. Погрешность аппроксимации не превысила 3,7% во всем диапазоне наблюдения усредненной переходной функции ($0 < t < 2$ с). Значения параметров схем замещения, полученные таким способом, приведены в таблице, а соответствующая им обобщенная ч.х. показана на рис 3. (кривая 4). Из анализа таблицы и рис.3 следует, что результаты обобщения электромагнитных параметров во временной области практически совпали с соответствующими данными, полученными путем обобщения в частотной области.

ВЫВОДЫ

1. Предложен подход, позволяющий осуществлять обобщение динамических свойств массивных конструктивных элементов ротора турбогенератора в частотной и временной областях.

2. Получены обобщенные относительные параметры четырехконтурных Г-образных схем замещения турбогенераторов, позволяющие с погрешностью не более 15% рассчитывать частотные характеристики проводимости со стороны обмотки статора и адекватные им схемы замещения турбогенератора конкретного типа при разомкнутом и короткозамкнутом состоянии ОВГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калюжный А.Х. Типовые частотные характеристики и определение параметров контуров на роторе крупных турбогенераторов. Применение частотных методов в электроэнергетическом исследовании – Труды СибНИИЭ. - 1972. - № 21. - С. – 118 - 131.
2. Лукашев Э.С., Калюжный А.Х., Гамм Б.З. Определение и использование в расчетах типовых характеристик и параметров демпферных контуров турбогенераторов // Электричество.-1977. - № 7. – С. 27 –32.
3. Рогозин Г.Г., Заболотный И.П. Параметры эквивалентных контуров схем замещения ротора обобщенного турбогенератора // Электротехника. – 1980. - №5. – С. 5 – 10.
4. Якушов В.М. Операторные сопротивления ротора турбогенератора их использование для определения электромагнитных параметров // Электричество. - №2. – 1992. – С.23-30.
5. Казовский Е.Я., Рогозин Г.Г., Горин В.Я. Исследование частотных характеристик турбогенераторов // Электротехника. - 1975. - № 1. – С. 9 – 13.
- 6 Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - 624 с.
7. Ларин А.М., Ларина И.И., Гуедиди Фаузи. Упрощенная модель синхронной машины для расчета трехфазных коротких замыканий с учетом многоконтурности и несимметрии ротора. Научные труды ДонГТУ, серия Электротехника и энергетика, вып.4. Донецк. - 1999. – С. 60-64.
8. Рогозин Г.Г., Ларин А.М. Расчет параметров эквивалентных роторных контуров синхронных машин по их экспериментальным частотным характеристикам // Электричество. - 1974. - № 6. - С. 10-13.