



**ТИТКО А.И.**, чл.-корр., докт. техн. наук,  
**ФЕДОРЕНКО Г.М.**, докт. техн. наук,  
Институт электродинамики НАНУ;  
**ЛИВШИЦ А.Л.**, канд. техн. наук, АО "МЭА"ЭЛТА";  
**КОБЗАРЬ К.А.**, зам. гл.конструктора, ГП з-да "Электротяжмаш".

## ТАНГЕНЦИАЛЬНАЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В КРАЙНИХ ПАКЕТАХ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ

**И**звестно [1–5], что в турбогенераторах в эксплуатационных режимах нагрев крайних пакетов имеет существенную неравномерность. В некоторых режимах отношение максимальных температур до средних по окружности крайнего пакета может достигать значений порядка 2–3.

Анализ известных результатов исследований показывает, что тепловая неравномерность обусловлена следующим обстоятельством.

В крайнем пакете сердечника статора, и особенно в его зубцовой зоне, потери на вихревые токи, источники тепла, выделяются под действием аксиального магнитного потока, который на поверхности пакета представляет сумму магнитных потоков, вытесненных из зазора и пазов, токов лобовых частей обмоток статора и ротора, токов нажимной плиты и экрана. Каждый из этих составляющих суммарного магнитного потока является существенным, должен учитываться при анализе электромагнитных и тепловых характеристик и имеет свои особенности. Поле токов нажимной плиты и экранов в зоне коронок зубцов уже ослаблено и его здесь для крайних сегментов статора с неглубоким скосом можно не учитывать.

При расчете в крайних пакетах магнитного поля лобовых частей обмотки статора в рассматриваемой области, в силу конструктивных особенностей, необходимо также учитывать пространственные гармоники и от этого зависит тангенциальная неравномерность поля по окружности.

Но наибольшее влияние на эту неравномерность оказывает вытесненное на поверхность зубцов поле пазового рассеяния. Если остальные поля бегущие, то это поле пульсирующее. Поле пазового рассеяния имеет сдвиг по фазе по отношению к другим полям и значение фазы изменяется при изменении режимов работы. Так, поле пазового рассеяния на середине фазной зоны отстает от бегущего поля обмотки статора на угол  $\pi/2$ . На разных сторонах зубца, расположенного, например, между пазами со стержнями тока одной фазы, векторы индукции пазового рассеяния меняют знак. Это относится и к полю в пазах, которые

образуются в результате ответвления в пазы магнитного потока, а замыкающегося через сердечник статора с учетом того, что крайний пакет более насыщен, чем средние пакеты. Поэтому тепловая неравномерность наблюдается в режиме холостого хода (ХХ).

Ясно, что распределение тепловых и электромагнитных характеристик по окружности в крайнем пакете существенно зависит от значений углов сдвига векторов индукции отдельных составляющих поля, а последние существенно зависят от режима работы и положения зубца по отношению пазов, в которых уложены два стержня одной или разных фаз. Угол сдвига фаз индукции разных составляющих поля изменяется также в радиальном направлении.

Приведем методику определения электромагнитных характеристик в зубцах крайних пакетов сердечника статора турбогенератора в различных режимах эксплуатации.

Ввиду сложности расчета поля в прямой постановке (трехмерный характер поля и существенно неоднородные среды) задачу нахождения электромагнитных характеристик осуществляют путем перехода от простых к сложным математическим моделям. Для этого используем широко применяемое в мировой практике [6] масштабное моделирование, которое предполагает создание многоуровневых моделей нахождения электромагнитных характеристик крайнего пакета сердечника статора ТГ.

Далее приводится алгоритм нахождения электромагнитных характеристик в листах крайнего пакета сердечника статора ТГ.

Характеристики магнитного поля у торцевой поверхности крайнего пакета сердечника статора турбогенератора, возбуждаемого обмотками ротора и статора, рассчитываются по методике [4]. Таким образом, мы находим аксиальную составляющую индукции магнитного поля на поверхности крайних пакетов сердечника статора, которая представляет собой суперпозицию полей токов лобовых частей обмотки статора и ротора, и поля, вытесненного из зазора. При этом задается



сдвиг фаз между бегущими плотностями токов обмоток статора и ротора  $\Psi$ , который равен [4]

$$\Psi = \theta + \varphi + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}(1 - \beta), \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол нагрузки,  $\varphi$  – угол мощности,  $\beta$  – коэффициент укорочения. Угол нагрузки находится из выражения

$$\theta = \arctg\left(\frac{x_d I + U \sin \varphi}{U \cos \varphi}\right) - \varphi, \quad (2)$$

где  $x_d$  – синхронная индуктивность обмотки статора (ОС),  $I, U$  – фазные ток и напряжение статора. В режимах недозавозбуждения, в которых в исследуемой области наблюдаются максимальные температуры, угол мощности  $\varphi$  меняет знак.

Так как при расчете поля от токов ОС и обмотки ротора (ОР) математическая модель не учитывает наличия электропроводящих деталей (экраны, плиты), токи которых существенно влияют на характеристики поля в зоне крайних пакетов [4], то эта составляющая поля находится отдельно. Задачу нахождения этого поля можно разбить на две подзадачи: нахождение токов в экране и плите с учетом найденного поля рассеяния лобовых частей ОС и ОР, и расчет поля токов этих электропроводящих деталей в области зубцовой зоны крайних пакетов. Задачу можно упростить, учитывая тот факт, что это поле возбуждается тангенциальными токами, которые замыкаются на внутренних краях плиты и экрана.

Поле разового рассеяния в зоне крайних пакетов рассчитывается с учетом насыщения, которое здесь имеет место в связи с проявлением краевого эффекта. Вытесненное из паза поле рассеяния на поверхности зубца и распределение его характеристики по ширине зуба рассчитывается по отдельной методике, изложенной в [4]. Для генератора ТГВ-200 максимальное значение индукции пазового рассеяния составляет 0,8 Тл (у коронок зубцов).

В некоторых режимах при насыщении ввиду краевого эффекта в крайнем пакете значение пазового рассеяния уменьшается в 1,5 раза.

При суммировании этого поля с полем токов ОС, ОР, экранов и плиты необходимо учитывать, что поле пазового рассеяния пульсирующее и отстает от поля ОС на угол  $\pi/2$ . То есть, если индукции магнитного поля пазового рассеяния задать в виде

$$B_{\text{пл}} = B_{\text{оп}} \cos(\omega t), \quad (3)$$

то поле ОС будет иметь вид

$$B_{\text{зст}} = B_{\text{ост}} \cos(\omega t - p\alpha + \pi/2), \quad (4)$$

где  $\alpha$  – координата по окружности.

При суммировании поля на поверхности разных пазов по окружности, следует учитывать для поля пазового рассеяния угол сдвига токов стержней фаз, укладываемых в соседних пазах (3), и распределение индукции суммарно вращающегося поля (4) для конкретного значения  $\alpha$ , соответствующего выбранному зубцу.

Потери в сегментах крайних пакетов рассчитываются из двухмерной модели поперечного сечения машины с учетом конструкции зубцов



Рис. 1. Распределение по окружности намагничивающей силы  $F$  одного слоя обмотки статора турбогенератора ТГВ-200 на оси фазы  $A$  с учётом пространственных гармоник на  $(\omega t - \text{частота})$



Рис. 2. Распределение по окружности намагничивающей силы  $F$  одного слоя обмотки статора турбогенератора ТГВ - 200 с учётом пространственных гармоник ( $\alpha - \text{координата по окружности}$ )



Рис. 3. Распределение по окружности намагничивающей силы  $F$  двухслойной обмотки статора турбогенератора ТГВ-200 с учётом пространственных гармоник. Коэффициент укорочения 0,8 ( $\alpha - \text{координата по окружности}$ )



(прорези, скос и др.), задавая в найденное суммарное аксиальное поле как внешнее, которое наводит в сегментах статора вихревые токи [8].

Вместо приведенных здесь методик расчета отдельных составляющих поля на поверхности пакета статора ТГ могут быть выбраны другие, в т.ч. с использованием современных пакетов прикладных программ, например MATLAB и другие.

Остановимся дальше на влиянии пространственных гармоник на распределение характеристик поля по окружности крайнего пакета сердечника статора.

Как известно [1], это также является фактором неравномерности тепловых и электромагнитных характеристик. Для исследования рассмотрено распределение намагничивающей силы  $F$  на окружности с учетом пространственных гармоник. С помощью компьютерного моделирования был проведен анализ различных составляющих выражения для  $F$  [7], особенности поведения которых представлены на Рис. 1–3.

Из этих рисунков видно, что на окружности наблюдаются 6 сечений, в которых максимально повышается намагничивающая сила (Н.С.)  $F$ . Однако, эти повышения составляют 5÷10%. Дополнительные потери в связи с неравномерностью распределения высших гармоник НС и, соответственно, магнитной индукции могут возрастать до 20%.

Учет пространственных гармоник особенно важен для поля лобовых частей ОС. Начиная с некоторого радиуса на зубцовой поверхности крайних пакетов статора, это поле становится наиболее существенным. Поэтому, для учета пространственных гармоник, необходимо уточнение коэффициентов распространения НС и индукции магнитного поля.

Для этого при разложении в ряд Фурье необ-

ходимо учитывать, что НС катушки обмотки статора распределена дискретно по окружности, и на зубцах токи отсутствуют. Амплитуда  $\nu$ -й гармоники будет зависеть от ширины паза  $b_{II}$  и ширины зубца  $b_{Zr}$ , и от их соотношения.

При изменении радиуса, это соотношение меняется, так как меняется ширина зубца  $b_Z$ , и будут меняться гармонические составляющие. Так, в коэффициенте распределения обмотки  $k_{pv}$  выражение  $\cos \nu\alpha/2$  необходимо представить в виде

$$\sin \nu \frac{b_{II}}{2} + 2 \sum_{\kappa=1}^{(q-1)/2} \sin \nu \frac{\kappa b_{II}}{2} \cos \nu \left( \frac{b_{II}}{2} + \kappa \frac{b_{II}}{2} + \kappa b_{Zr} \right), (5)$$

где  $q$  – число катушек в обмотке.

Видно, что при  $b_{Zr} = 0$  выражение (5) будет равно  $\cos \nu\alpha/2$ . Выражение (5) получено при условии, что  $q$  – нечетное число.

Но основное влияние на тангенциальную неравномерность оказывает различное по амплитуде и фазе поле пазового рассеяния, вытесненное из разных пазов.

На основе изложенной методики проведены расчеты электромагнитных и тепловых характеристик для 4 типовых зубца по окружности.

Результаты расчетов приведены в Табл. 1, 2 и на Рис. 4, 5. Приведенные варианты режимов работы выбраны, исходя из того, что для них получены экспериментальные данные по температурам либо аксиальной индукции [3, 9]. На Рис. 5 приведена схема расположения стержней в пазах различных фаз обмотки статора. Из этой схемы видно, что существует четыре положения на фазной зоне, которые имеют существенное отличие по вытесненному с двух сторон зубца пазового рассеяния на поверхности зубца. I область относится к зубцам, которые находятся между пазами с уложенными в них стержнями одной фазы, II

Таблица 1. Эксплуатационные характеристики турбогенератора ТГВ-200 для различных режимов работы

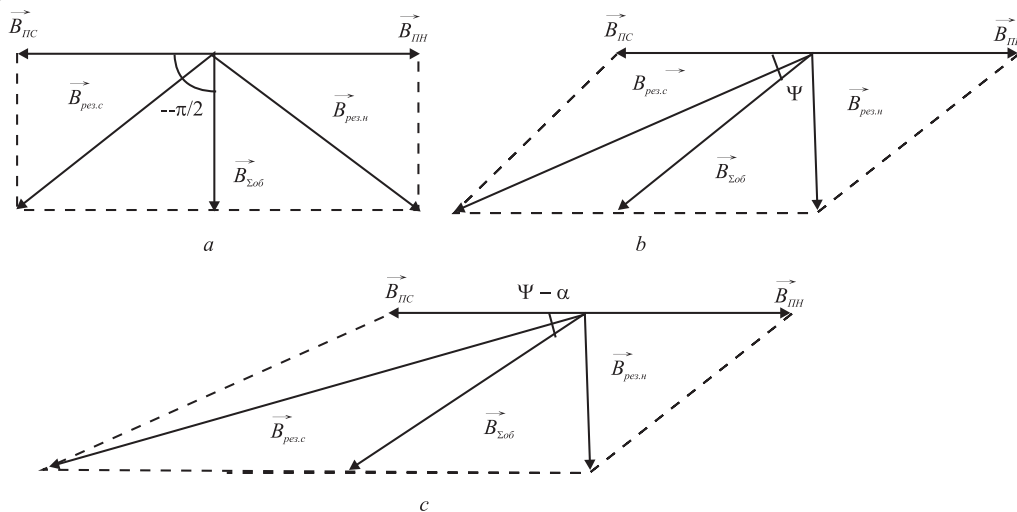
№ вар.	$I$ , кА	$U$ , кВт	$p$ , МВт	$\cos\phi$	$i_f$ , Ка	$\theta$	$\Psi$	$B_z$ , Тл	$\Delta T$ , град
1	8,42	16,08	200	0,85 (инд.)	1858	0,654	2,78	0,47	31
2	7,56	14,98	197	0,998 (емк.)	1240	1,075	2,58	0,45	36
3	5,62	14,78	134	0,924 (емк.)	844	1,136	2,31	0,38	30
4	7,68	15,3	200	1	1300	0,735	2,62	0,46	33
5	8,625	15,75	200	8,85	1880	0,509	2,95	0,46	31
6		15,75	XX		713	0		0,48	
7	8,625		КЗ	0	1253	0	3,45	0,18	

Таблица 2. Аксиальная составляющая индукции магнитного поля КЗ и превышение температуры  $\Delta T$  в зоне коронок зубцов крайнего пакета сердечника статора турбогенератора ТГВ-200 для номинального режима в четырех типовых сечениях по окружности

№ вар.	$B_z$ , Тл				$\Delta T$ , град			
	I обл.	II обл.	III обл.	IV обл.	I обл.	II обл.	III обл.	IV обл.
1	0,46	0,59	0,42	0,49	31	50	25	35







векторы бегущего поля ( $\vec{B}_{\Sigma об}$ ) будут менять фазу, сближаясь к вектору  $\vec{B}_{ПС}$  и тем самым отклоняясь от вектора  $\vec{B}_{ПН}$  (Рис. 6, с). Величина  $B_{рез.с}$  растёт, а  $B_{рез.н}$  – падает. Среднее значение по ширине зубца  $B_{ср}$  повышается. Для второго положения зубцов (II область).  $B_{ПС}$  в два раза больше, чем  $B_{ПН}$ . И так как на сбегующем краю вектор поля пазового рассеяния на поверхности зубца

Рис. 6. Векторная диаграмма для расчета индукции магнитных полей на зубцах крайнего пакета статора ТГ:  $B_{ПС}$ ,  $B_{ПН}$  – индукция поля пазового рассеяния на сбегующем и набегающем краю

зубцов;  $B_{\Sigma об}$  – суммарная индукция обмоток ротора и статора генераторов;  $B_{рез.с}$ ,  $B_{рез.н}$  – индукция результирующего поля на сбегующем и набегающем краю зубцов.

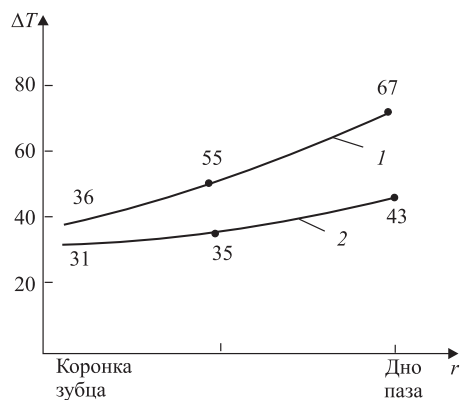


Рис. 7. Превышения средней по ширине зубца температуры крайних пакетов сердечника статора турбогенератора ТГВ-200 в двух режимах для области I: 1 – режим 1, 2 – режим 2.

суммируется с  $\vec{B}_{\Sigma об}$ , а на набегающем  $B_{ПН}$  вычитается, то  $B_{ср}$  максимально увеличивается. Кроме того, угол фазы вектора  $B_{ПН}$  поворачивается в сторону вращения ротора. Для третьего положения (III область) вытесненное поле пазового рассеяния минимально, то и минимальной становится  $B_{ср}$ . Для четвертого положения (IV область) в силу уже указанных соображений  $B_{ср}$  повышается, хотя, очевидно, меньше во втором положении. При движении далее по окружности картина эта будет повторяться, так как при этом вектор индукции  $\vec{B}_{\Sigma об}$  вращающего поля будет изменять фазу.

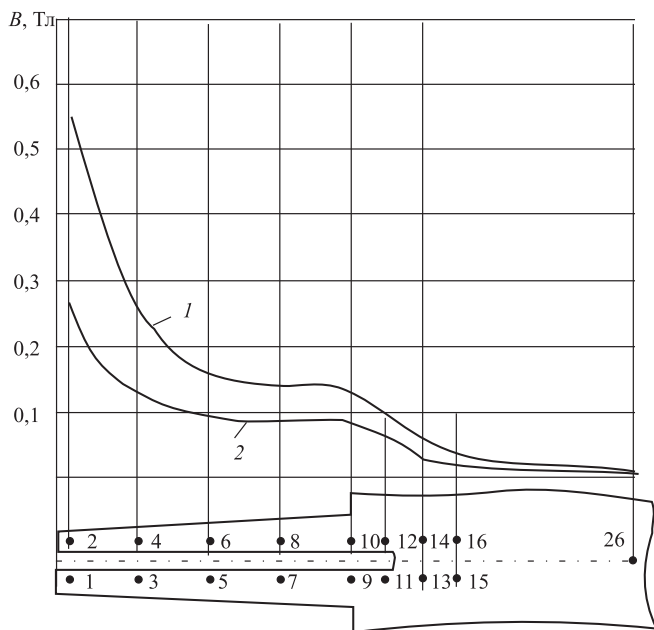


Рис. 8. Аксиальная составляющая индукции  $B_z$  на сбегующем и набегающем краях зубца крайнего пакета статора турбогенератора ТГВ-200 в номинальном режиме ( $\cos \varphi = 0,85$ ): 1 – Датчики 2, 4, 6, 8, 13, 18, 23, 26; 2 – Датчики 1, 3, 5, 7, 9, 12, 16, 21, 26.

Также в изменение магнитных и, как следствие, тепловых характеристик внесет коррективы учет высших пространственных гармоник. На Рис. 5 приведены данные по температурной неравномерности по окружности, которые рассчитаны на основе экспериментальных данных для генератора меньшей мощности [1] и масштабированы по нагрузке для турбогенератора ТГВ-200. Видно, что полученные расчетные данные по температуре коррелируют с экспериментальными [1] по характеру изменения их по окружности и несколько отличаются по значениям, так как режимы для этих двух случаев отличаются.

Здесь приведены температуры в области коронок зубцов. В области дна паза температуры повышаются [4]. На Рис. 7, для примера, приведены экспериментальные данные по превышениям усредненного по ширине зубца температуры крайних пакетов статора турбогенератора для



практически номинального режима (режим 1, Табл. 1) и режима недо возбуждения (режим 2, Табл. 1) Видно, что у дна паза температура существенно возрастает по отношению к температуре у коронок зубца, для второго режима — в два раза. Величина  $\Delta T$  и по ширине зубца меняется.

Из Рис. 8 и Табл. 3 [3] видно, что влияние потока пазового рассеяния остается существенным также и у дна паза. Поэтому влияние пазового рассеяния у дна паза крайнего пакета статора в разных сечениях по окружности будет также существенным и тангенциальная неравномерность аксиальной составляющей индукции и температур у дна паза будет явно выраженной и определять нагрузочные возможности турбогенератора. Следует ожидать, что в зубцах максимальных температур (II область) температура может превышать  $100^\circ$  и более в режимах недо возбуждения.

Для более точных оценок необходимо провести дополнительные исследования. Ясно, что в некоторых режимах, например, режимах недо возбуждения температуры для турбогенератора ТГВ-200 в отдельных по окружности зубцах будут ограничивать мощность, а поэтому целесообразно применять конструктивные меры для выравнивания температуры крайних пакетов в тангенциальном направлении.

Благоприятным здесь является тот факт, что наиболее серьезное внимание необходимо уделить снижению температуры в шести сечениях по окружности крайних пакетов. Здесь исследования проведены на основе некоторых усреднений. Поэтому в виду значимости этой проблемы для существующих и перспективных генераторов целесообразно провести более детальные исследования тангенциальной неравномерностей при изменении режимов работы, а также характера изменения электромагнитных и тепловых характеристик по высоте и ширине зубцов, в т.ч. на основе натурального эксперимента, изучения других особенностей тангенциальной неравномерности характеристик,

**Таблица 3.** Отношение величины  $B_z/2k$ , ( $k = 1, \dots, 6$ ) на сбегавшем крае к величине  $B_z/2k - 1$ , ( $k = 1, \dots, 6$ ) на набегавшем крае зубца крайнего пакета статора турбогенератора мощностью 200 МВт в номинальном режиме.

$k$	1	2	3	4	5	6
$B_z(2k) / B_z(2k - 1)$	2	2	1,7	1,5	1,4	1,03

в частности при совершенствовании конструкции ТГ, направленного на снижение уровней нагрева и указанной неравномерности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Костяев Б.В., Пташкин А.В. О нагреве крайних пакетов сердечника статора крупных турбогенераторов при недо возбуждении //Электрические станции. — 1979. — № 5. — С. 40—44.
2. Данилевич Я.Б., Питко Р.М. Магнитное поле в торцевой зоне сердечника статора электрической машины переменного поля с учетом влияния пазового рассеяния.//Электротехника. — 1982. — № 9. — С. 36—39.
3. Смородин В.И., Карацуба А.С., Руденко Л.Н. и др. Некоторые особенности электромагнитных процессов на торце статора турбогенератора //Техн. электродинамика. — 1983. — № 3. — С. 65—72.
4. Титко А.И. электромагнитное экранирование незамкнутыми структурами в электрических машинах. —К. Наук. думка, 1994. — 139 с.
5. Счастливый Г.Г., Титко А.И., Бабяк А.А., Кади-Оглы И.А. Распределение на полюсном делении электромагнитного поля в крайнем пакете сердечника статора электрической машины. Физико-технические проблемы надежности электрических машин. Сб. науч. тр. Киев, 1986. — С. 3—10.
6. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. —К.: Изд. Ин-та электродинамики НАН Украины, 2011. — 255 с.
7. Вольдек А.И. Электрические машины. Энергия, Ленинградское отделение, 1974. — 840 с.
8. Титко О.І., Васьковський Ю.М. Струми і втрати в листах крайніх пакетів осердя статора турбогенераторів. Праці Ін-ту електродинаміки. — 2012. — № 3.
9. Счастливый Г.Г., Титко А.И., Федоренко Г.М., Коваленко В.П. Надежность современных и перспективных турбогенераторов. — К.: Наук. думка, 1978. — 224 с.

© Титко А.И., Федоренко Г.М., Лившиц А.Л., Кобзарь К.А., 2012

