

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЗУБЦАХ КРАЙНЕГО ПАКЕТА СТАТОРА В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ

**Задача розрахунку вихрових струмів і додаткових втрат потужності в зубцях крайнього пакета осердя статора розв'язується чисельним методом з урахуванням реальної конструкції турбогенератора в цілому і його елементів. Порівнюються вказані втрати при різних варіантах зубців крайнього пакета.**

**A problem of calculations of eddy currents and added power losses in stator end core-lamination stack teeth is solved via a numerical method taking into account existing design of both a turbogenerator in large and its elements. The mentioned losses are compared for various end stack tooth shapes.**

Отличительной особенностью электромагнитных процессов в торцевой зоне электрических машин является возникновение в крайних пакетах сердечников вихревых токов (ВТ) и соответственно дополнительных магнитных потерь мощности (ДМПМ) [1]. Это явление оказывается критическим в машинах переменного тока предельной мощности - турбогенераторах [2]. Анализ этой проблемы посвящен значительный ряд исследований, к основополагающим из которых относятся, например, работы [1,3,4]. В них анализ проводится посредством аналитических методов расчета, которые хотя и дают физически и качественно правильное представление рассматриваемых процессов, но сопряжены с целым рядом серьезных упрощений, приводящих к неадекватным количественным результатам. Более реалистичные, хотя возможно еще и не всеобъемлющие, результаты дают численные методы расчета электромагнитных процессов в торцевой зоне электрических машин, что отмечено в [5,6].

**Целью данной работы** является проведение анализа ДМПМ в зубцах крайнего пакета сердечника статора турбогенератора именно на основе численных расчетов ВТ. Этот анализ является сравнительным и направлен на выявление количественного влияния на ДМПМ принципиальных конструктивных решений в зубцовой зоне концевого пакета сердечника статора.

Для конкретизации проводимого анализа избрана типовая конструкция, соответствующая турбогенератору мощностью порядка 200 МВт [2,4], которая рассматривалась нами в [7]. Фрагмент базового варианта торцевой зоны такого турбогенератора дан на рис.1. Характерными особенностями этого варианта являются ступенчатая структура сердечника статора ввиду укорачивания зубцов крайних пакетов этого сердечника, а

также постепенно уменьшающаяся их толщина (основные пакеты имеют толщину 60 мм и зазор под ними 100 мм; крайний пакет в 20 мм имеет укороченные на 36 мм зубцы).

Зубцовая структура сердечника статора целиком показана в [7], а на рис.2 дано одно (из тридцати) зубцовое деление с частичным захватом спинки сердечника. Здесь имеются характерные для крайнего пакета прорезы, служащие для уменьшения величин ВТ и ДМПМ [2] (пунктиром показан контур неукороченного зубца).

**Основой расчета ВТ** в крайнем пакете сердечника статора, открывающей новые возможности для получения количественных результатов, является разработанная ранее методика численного расчета магнитного поля в концевой зоне турбогенератора в режиме нагрузки [7]. Она учитывает структуру пакетов сердечника статора и их зубцовой зоны, насыщение и шихтовку стали.

Исходными данными для расчета ВТ является полученное по методике [7] распределение аксиальной составляющей магнитной индукции в крайнем пакете. Причем используется не только магнитное поле на поверхности крайнего пакета [8], что является недостатком многих работ, а по всей его толщине. Так по толщине крайний пакет был условно разбит на 10 слоев и в плоскости каждого слоя (рис.2) использовалось свое распределение магнитного поля.

Расчет магнитного поля в [7] дает двухкоординатное  $(r, z)$  амплитудное распределение аксиальной составляющей магнитной индукции  $B_{z,m}$  с периодом по угловой координате  $\varphi$  в два полюсных деления. Так как зубец по сравнению с полюсным делением достаточно узок, то на основании [9] в пределах его ширины (рис.2) функция магнитной индукции принята соответствующей пульсирующему магнитному полю с постоянным по ширине зубца и зависящим от одной координаты значением  $B_{z,m}(r)$ , то есть

$$b_z = B_{z,m}(r) \sin \omega t, \quad (1)$$

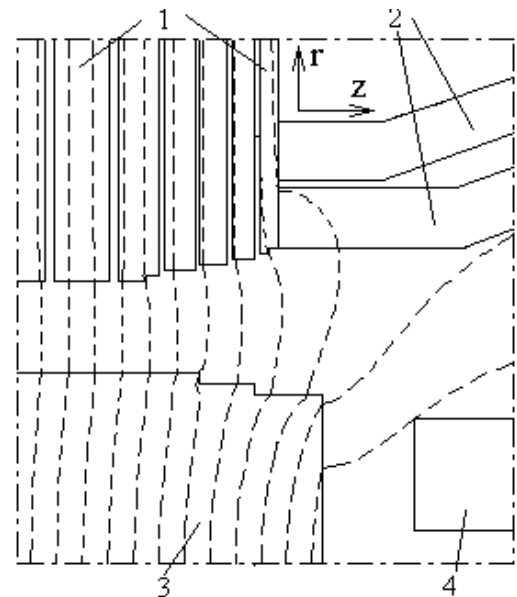


Рис.1. Торцевая часть турбогенератора: 1 - пакеты сердечника и 2 - лобовая часть обмотки статора; 3 - сердечник и 4 - обмотка ротора

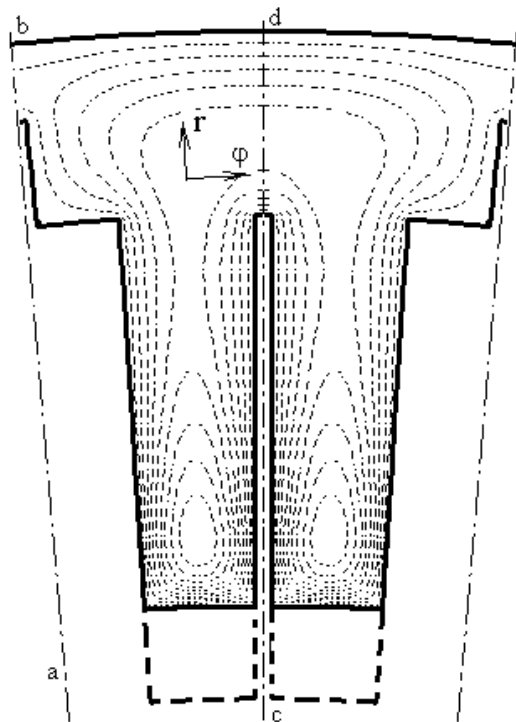


Рис.2. Зубец крайнего пакета

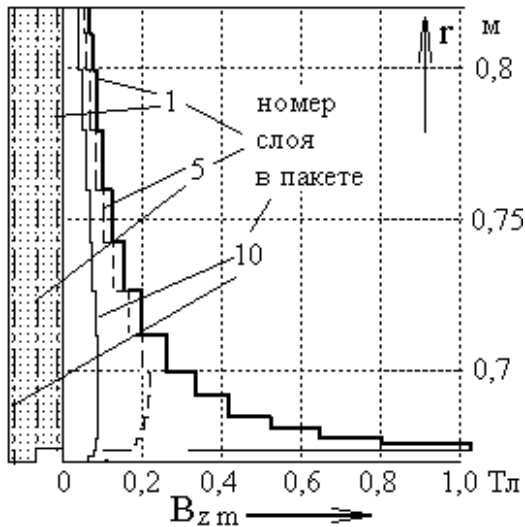


Рис.3. Распределение магнитной индукции в зубце крайнего пакета

где  $\omega=314 \text{ с}^{-1}$  - циклическая частота;  $t$  - время.

Фрагмент общей картины магнитного поля для базового варианта торцевой зоны дан в виде силовых линий на рис.1. А примеры распределения  $V_{z,m}(r)$  по высоте зубца показаны на рис.3 для трех слоев (с номерами 1, 5 и 10) крайнего пакета, считая от поверхности, обращенной в торцевую зону турбогенератора.

**Расчеты ВТ** проведены на базе методики из [10,11]. ВТ рассматриваются в плоскости листов сердечника статора от действия магнитной индукции, заданной функцией (1). В локальную область расчета кроме зубца включена часть спинки сердечника (рис.2) для обеспечения свободного выхода ВТ за пределы зубца. Ввиду симметрии расчетная модель по ширине огра-

ничивались половиной зубцового деления при соответствующих граничных условиях на ограничивающих радиальных линиях  $ab$  и  $cd$ .

Функция плотности ВТ  $\vec{j}(r, \varphi, t)$  описывалась на основе второго уравнения из системы Максвелла, а именно уравнением

$$\text{rot}(\rho \vec{j}) = -\vec{k} \frac{\partial b_z}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление ( $\rho=0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ );  $\vec{k}$  - орт по оси  $z$ .

При решении уравнения (1) реакция ВТ учитывалась не напрямую, а косвенно посредством задания эквивалентных магнитных свойств пакетов сердечника при расчете магнитного поля на основе рекомендаций [1].

Для решения уравнения (2) используется вспомогательная функция  $\vec{v}(r, \varphi, t)$  - векторный электрический потенциал (ВЭП), связываемый с плотностью тока соотношением

$$\text{rot} \vec{v} = \vec{j}. \quad (3)$$

С учетом (1)-(3) получается в полярной системе координат, принятой в расчетной модели на рис.2, подлежащее решению дифференциальное уравнение

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho_\varphi r \frac{\partial V_{z,m}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \rho_r \frac{\partial V_{z,m}}{\partial \varphi} \right) = -\omega V_{z,m}, \quad (4)$$

где  $V_{z,m}$  - амплитуда аксиальной составляющей ВЭП,  $\rho_\varphi, \rho_r$  - координатные составляющие удельного электрического сопротивления, введение которых позволяет на основе [12] использовать эффективную аппроксимацию области расчета с трапециевидным зубцом (рис.2) полярной сеточной моделью.

Решение уравнения (4) достигалось как и в [10,11] численно методом конечных разностей при использовании упомянутой сеточной модели. При этом по контуру зубца принималось граничное условие  $V_{z,m} = 0$ , а на линиях симметрии  $ab$  и  $cd$  -  $\frac{\partial V_{z,m}}{\partial \varphi} = 0$ .

Таблица 1

Величины ВТ и ДМППМ в слоях зубца

Вариант зубца	Но- мер слоя	Плотность ВТ, А/мм <sup>2</sup>		Плотность ДМППМ, Вт/см <sup>3</sup>		ДМППМ, Вт P <sub>С</sub>
		J <sub>S</sub>	J <sub>max</sub>	P <sub>V S</sub>	P <sub>V max</sub>	
W1	1	1,23	4,97	0,555	6,18	15,38
	4	1,00	2,89	0,351	2,09	9,74
	7	0,76	2,04	0,198	1,04	5,68
	10	0,49	1,13	0,079	0,32	2,27
W2	1	2,09	8,14	1,554	16,6	46,9
	10	0,90	1,98	0,255	0,98	7,98
W3	1	1,20	5,54	0,573	7,68	19,1
	10	0,85	3,17	0,287	2,51	9,56

Решением уравнения (4) получается в области расчета распределение ВЭП  $V_{z,m}(r,\varphi)$ . На основе (3) определяются координатные составляющие амплитуды, а также действующее значение плотности ВТ

$$J_{r,m} = \frac{1}{r} \frac{\partial V_{z,m}}{\partial \varphi};$$

$$J_{\varphi,m} = -\frac{\partial V_{z,m}}{\partial r};$$

$$J = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{J_{r,m}^2 + J_{\varphi,m}^2}. \quad (5)$$

По плотности тока находится объемная плотность ДМППМ

$$P_V = \rho J^2, \quad (6)$$

что дает основу для определения ДМППМ в зубце, приходящиеся на выделенный слой:

$$P_C = d_c k_3 \sum_{k=1}^n P_{V,k} S_k, \quad (7)$$

где  $S_k$ ,  $P_{V,k}$  - площадь  $k$ -ячейки сетки и плотность ДМППМ в ней;  $n$  - число ячеек в пределах зубца;  $d_c$ ,  $k_3$  - толщина слоя и коэффициент заполнения его сталью.

**Представление результатов расчетов** ВТ начнем с их общей картины в виде линий  $V_{z,m} = \text{const}$ , которая представлена на рис.2 и соответствует слою 1 (максимальное значение  $V_{z,m,\text{max}}$  составило 40,3 кА/м). В других слоях по толщине пакета стали картины имеют в целом аналогичный характер с некоторыми отличиями и с последовательным уменьшением значений ВЭП (так в слое 10  $V_{z,m,\text{max}} = 14$  кА/м).

Картина ВТ свидетельствует о существенно неравномерном их распределении как по ширине, так и по высоте зубца. Это же касается соответственно и плотности ДМППМ. Так, если усреднить их плотность по ширине зубца, то по его высоте в слое 1 такое усредненное значение меняется от 3,88 Вт/см<sup>3</sup> в головке зубца до 0,2 Вт/см<sup>3</sup> у основания; в слое 10 соответственно - от 0,087 до 0,05 Вт/см<sup>3</sup>, а наибольшее значение 0,11 Вт/см<sup>3</sup> достигается в средней части зубца.

Для базового варианта зубца, представленного

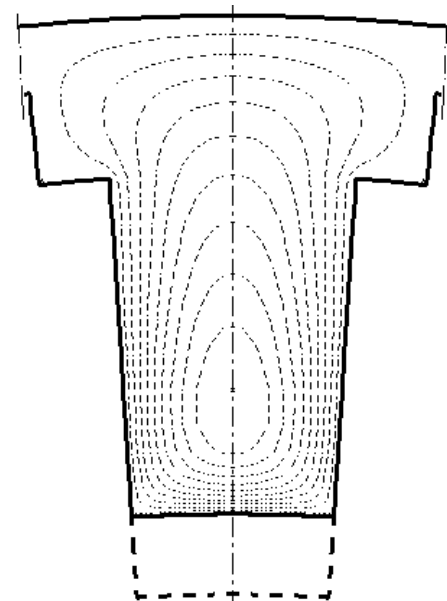


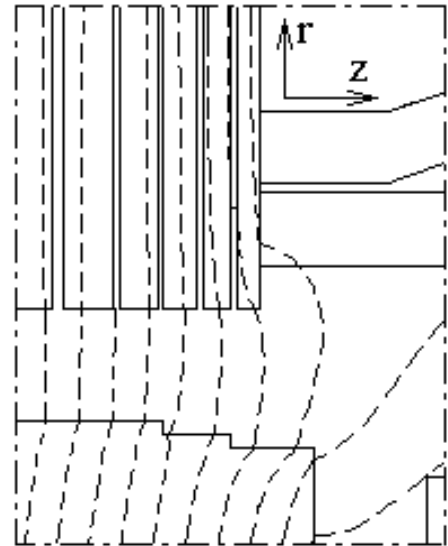
Рис.4. Укороченный зубец без рассечки

на рис.2, расчетные параметры по формулам (5)-(7) для некоторых слоев даны в табл.1 (это вариант W1), где индексы  $S$  и  $max$  обозначают среднее и максимальное значения. В целом для этого варианта зубца ДМПМ на все его слои составляют 81 Вт, а на все зубцы пакета - 2,43 кВт.

Чтобы выяснить, какую роль играет рассечка зубцов крайнего пакета на две части, были проведены расчеты ВТ также для укороченного, но целостного варианта зубца, представленного на рис.4 (этот вариант обозначим как W2). Здесь же дана общая картина ВТ для слоя 1 (значение  $V_{z,m,max}$  теперь составило 113,7 кА/м). Расчетные параметры ВТ и ДПМ этого варианта зубца также даны в табл.1 для двух его крайних слоев. В целом ДМПМ на все зубцы пакета составили 7,82 кВт, что в 3,2 раза больше, чем для базового варианта W1. В этом и проявляется роль рассечки зубца. Причем, как показали тестовые расчеты, эффективность рассечки увеличивается в случае больших значений соотношения высоты и ширины зубцов.

Еще один сравнительный расчет был проведен опять для рассеченного зубца, но при конструкции сердечника статора без укорочения зубцов его крайних пакетов. Этот вариант концевой зоны представлен ее фрагментом на рис.5 вместе с картиной рассчитанного магнитного поля. Конструкция этого варианта зубца крайнего пакета (обозначим его через W3) показана на рис.6. А на рис.7 для этого варианта даны графики распределения аксиальной составляющей магнитной индукции по тем же слоям крайнего пакета, что и на рис.3. Сравнивая варианты W1 и W3, отметим что при укороченном зубце в нем среднее значение  $B_{zm}$  составляет 0,129 Тл, при зубце полной длины - 0,17 Тл.

Рассчитанная картина ВТ для слоя 1 при  $V_{z,m,max} = 43,9$  кА/м показана на рис.6, а расчетные параметры ВТ и ДПМ варианта W3 для двух крайних слоев пакета - в табл.1. В этом варианте ДМПМ на все зубцы пакета составили 4,47 кВт, что в 1,8 раза больше, чем для базового варианта W1. То есть с этой точки зрения укорочение зубцов крайних пакетов сердечника статора является вполне обоснованным.



*Рис.5. Фрагмент концевой части турбогенератора с укороченными зубцами статора*

## ВЫВОДЫ

Как само магнитное поле, так и вызванные им ВТ и ДМППМ в зубце крайнего пакета сердечника статора турбогенератора распределены очень неравномерно. В среднем плотность ДМППМ по толщине пакета изменяется в 7 раз. А по высоте зубца в слое пакета, обращенном в торцевую зону, ДМППМ отличаются примерно в 19 раз, в противоположном слое значительно меньше - в 2 раза.

В рассмотренной конструкции турбогенератора введение прорези в зубцах крайнего пакета приводит к снижению ДМППМ в них в 3,2 раза, причем эффективность прорези оказывается ещё большей в относительно длинных зубцах.

Ступенчатое укорочение зубцов крайних пакетов сердечника статора приводит к уменьшению ДМППМ в 1,8 раза.

В целом представленная методика численного расчета позволяет получать реалистичные количественные оценки изменения ДМППМ в зубцах крайних пакетов сердечника статора турбогенератора, что необходимо при выборе параметров его конструкции, обеспечивающем снижение рассмотренных потерь.

1. *Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин / А.И.Вольдек, Я.Б.Данилевич, В.И. Косачевский и др. -Л.: Энергоатомиздат.-1983.-216 с.*
2. *Турбогенераторы. Расчет и конструкция / В.В.Титов, Г.М.Хуторецкий, Г.А.Загородная и др.-Л.:Энергия.-1967.-895 с.*
3. *Титко А.И., Счастливый Г.Г. Математическое и физическое моделирование электромагнитных полей в электрических машинах переменного тока. К.: Наукова думка, 1976. -200 с.*
4. *Электромагнитные и тепловые про-*

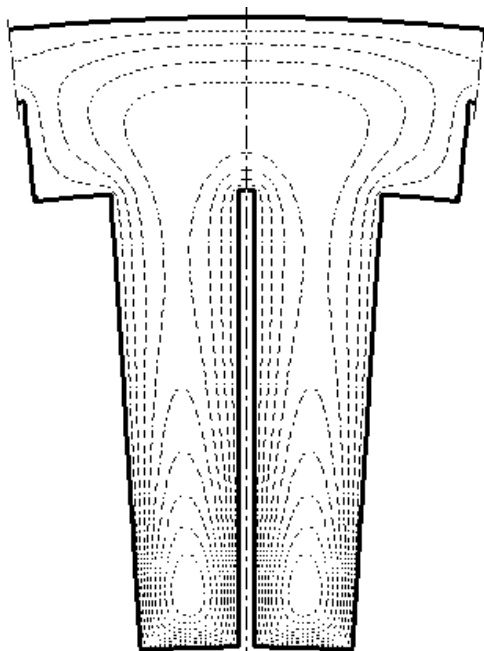


Рис.6. Неукороченный зубец с рассечкой

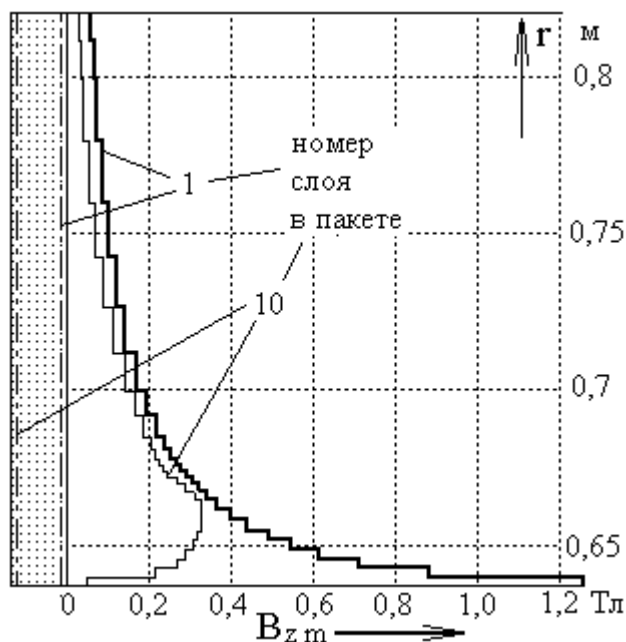


Рис.7. Распределение магнитной индукции в неукороченном зубце крайнего пакета

цессы в концевых частях мощных турбогенераторов. И.М. Постников, Л.Я. Станиславский, Г.Г. Счастливый и др.// Наукова думка.– Киев,1971.– 360 с. 5. Mecrow В.С., Jack А.Г., Cross С.С. Electromagnetic design of turbogenerator stator end regions // IEE Proc.С.-1989.- 136, №6.-РР.361-372. 6. Данько В.Г., Мілих В.І., Поляков І.В., Лівшиц О.Л., Черемісов І.Я. Деякі проблеми турбогенераторів з повітряним охолодженням // Вестник Харьк. политехн. ун-та, №84.-Харьков, ХГПУ, 2000.-С.73-76. 7. Милых В.И., Дубинина О.Н. Численный расчет магнитного поля в концевой зоне турбогенератора в режиме нагрузки // Электротехніка і електромеханіка.-2003.-№1.-С.64-69. 8. К расчету магнитного поля на поверхности торцев сердечника статора мощного турбогенератора. М.Ф.Горба-тюк, В.И.Сморозин, А.С.Карацуба и др.// Техническая электродинамика, 1980, №5.-С.61-65. 9. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах.-Л.: Энергоатомиздат, Ленинград. отделение, 1983.-256 с. 10. Данько В.Г., Милых В.И., Станкевич А.И. Вихревые токи в низкотемпературной зоне криостата в криодвигателе постоянного тока//Электричество.- 1982.-№11.-С.14-19. 11. Милых В.И. Расчет вихревых токов в тонкой оболочке, расположенной в двигателе постоянного тока с криогенным охлаждением // Электротехника.- 1985.-№4. -С.19-23. 12. Милых В.И. Принцип компенсации геометрических искажений при конечно-разностных полевых расчетах // Техническая электродинамика.- 1989.-№6.-С.20-26.