

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ СОВМЕЩЕННОЙ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА

Ю.В. Зубков

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрены различные схемы однослойных электрически совмещенных обмоток ротора вентильного генератора. Осуществлен анализ эффективности их использования в магнитных полях возбудителя и генератора. Сделан вывод о предпочтении обмоток.

Ключевые слова: вентильный генератор, электрически совмещенная обмотка.

Разработка и эксплуатация автономных электромашинных источников питания малой мощности (0,5-2) кВт для нужд авиации, автомобильного и железнодорожного транспорта является актуальной задачей. Эта работа ведется в направлении использования бесконтактных электромеханических преобразователей. Среди известных в настоящее время бесконтактных электрических генераторов наибольшее распространение получили генераторы с вращающимся выпрямителем, обладающие лучшими весовыми характеристиками. Одним из направлений совершенствования таких генераторов является магнитное и электрическое совмещение. Максимальный выигрыш при этом получается для ЭМП малой мощности, в которых возбудитель соизмерим по размерам с основной машиной.

В вентильном генераторе совмещенного типа (ВГСТ) в общем магнитопроводе размещены две машины: синхронный возбудитель и синхронный генератор [1]. Для сокращения расхода обмоточного провода, изоляционных материалов, упрощения технологии, повышения эксплуатационной надежности обмотка ротора ВГСТ выполнена электрически совмещенной и выполняет одновременно функции якорной обмотки возбудителя и обмотки возбуждения генератора. Числа пар полюсов возбудителя p_1 и генератора p_2 связаны соотношением $p_2 = m_R p_1$, где m_R – число фаз обмотки ротора.

Обмотка возбуждения возбудителя размещается в тех же пазах статора, что и якорная обмотка генератора, но занимает $\frac{2}{m_R}$ от общего числа пазов для ликвидации трансформаторной связи с магнитным полем генератора.

В зависимости от назначения электрически совмещенные обмотки выполняются либо с различными, либо с примерно одинаковыми обмоточными коэффициентами в магнитных полях, совмещаемых в общем магнитопроводе электрических машин. Например, обмотки одномашинных преобразователей частоты, выполняющие функции двигательной и генераторной обмоток, должны проектироваться с максимально возможными обмоточными коэффициентами как в магнитном поле двигателя, так и в поле генератора.

Совмещенные обмотки для бесщеточного возбуждения выполняют с максимально возможным обмоточным коэффициентом в поле основной машины (в нашем случае генератора). При таком подходе этот коэффициент относительно поля возбу-

дителя получается вынужденным, малым по величине из-за сильного укорочения шага.

Для оценки эффективности использования таких обмоток в качестве обмоток ротора вентильного генератора проведем анализ ряда схем. Предварительно следует очертить круг возможных для использования обмоток с точки зрения простоты технологии их изготовления и надежности.

В большинстве случаев многофазные электрические машины переменного тока имеют обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу $q = \frac{z}{2pt}$. Здесь z , p , t – числа пазов, пар полюсов, фаз. При этом все полюсно-фазные группы имеют одинаковое число катушек.

Существенным отличием машин переменного тока классического исполнения является то, что их обмотка якоря располагается в пазах статора, следовательно, не испытывает действия центробежных сил, что упрощает ее крепление, особенно в зоне лобовых частей. В машинах переменного тока важным является синусоидальное распределение магнитного поля в воздушном зазоре для получения синусоидального напряжения в обмотке якоря синхронных генераторов и отсутствия пульсаций электромагнитного момента асинхронных двигателей. Обмотки якоря таких машин выполняют двухслойными для улучшения формы кривой ЭДС путем исключения из нее высших гармонических за счет укорочения шага и распределения катушек в катушечной группе по пазам.

Вентильный генератор совмещенного типа обладает следующими особенностями:

- якорная обмотка возбuditеля (совмещенная обмотка) и полупроводниковые вентили располагаются на роторе, что вызывает при высоких частотах вращения существенные трудности с креплением этих элементов генератора;
- для уменьшения пульсаций выходного напряжения желательно иметь трапецидальное распределение магнитного поля в воздушном зазоре;
- для максимального использования по постоянному току обмотку следует выполнять с диаметральной шагом в поле генератора.

Для создания технологичной электрически совмещенной обмотки каждая катушка должна быть сосредоточена на отдельном зубце; таким образом, в идеальном случае мы получаем однослойную обмотку с числом пазов на полюс и фазу $q = 1$. В литературе встречаются следующие названия такой обмотки: дискретно-распределенная, зубцовая, одноплоскостная, неперекрещивающаяся.

Такая обмотка:

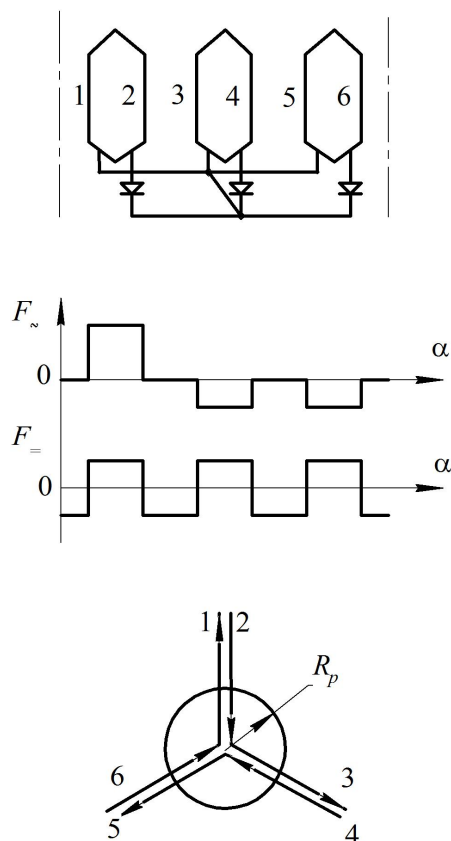
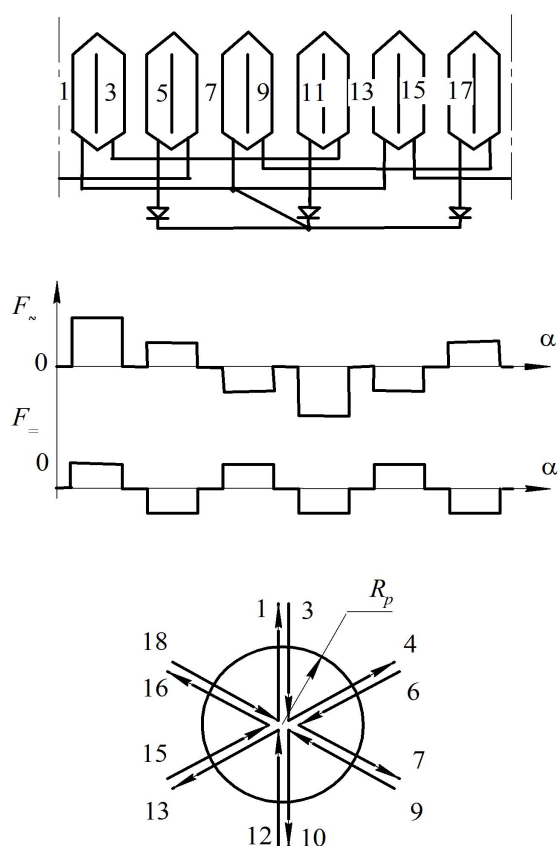
- позволяет повысить линейную токовую нагрузку за счет увеличения коэффициента заполнения паза и максимального использования объема ротора под обмотку;
- характеризуется малым вылетом лобовых частей, что обеспечивает ее надежное крепление на роторе;
- создает трапецидальную волну магнитодвижущей силы в воздушном зазоре.

Так как рассматриваемый генератор является машиной малой мощности и имеет небольшой диаметр ротора, число пазов на роторе ограничено минимально допустимой шириной зубцов по условиям их механической прочности. Учитывая это, примем максимальное количество пазов 18 для трехфазной обмотки и 30 – для пятифазной. Схемы пятифазных обмоток предполагают размещение на вращающемся роторе большего количества вентилях, что ведет к дополнительным трудностям. Однако такие схемы имеют меньший коэффициент пульсаций, поэтому они включены в диапазон анализируемых схем однослойных обмоток ротора ВГСТ (табл. 1).

Возможные варианты выполнения обмотки ротора

Число фаз m	Число пазов Z	Число полюсов возбудителя $2p_1$	Число полюсов генератора $2p_2$	Код обмотки
3	6	2	6	<i>A</i>
3	12	2	6	<i>B</i>
3	18	2	6	<i>C</i>
5	10	2	10	<i>D</i>
5	20	2	10	<i>E</i>
5	30	2	10	<i>F</i>

На рис. 1, 2 приведены схемы 3-фазных электрически совмещенных обмоток ротора, кривые распределения МДС по переменному ($F_{\sim}$) и постоянному ($F_{=}$) токам и диаграммы Гергера для определения коэффициента дифференциального рассеяния обмоток *A* и *C*. Схемы 5-фазных обмоток принципиально не отличаются от 3-фазных и имеют аналогичное распределение МДС.

Рис. 1. Обмотка *A*Рис. 2. Обмотка *C*

Проведем анализ обмоток (*A* – *F*) с точки зрения эффективности их использования в магнитных полях возбудителя и генератора, полагая синусоидальным распределение поля в зазоре и отсутствие насыщения магнитопровода ВГСТ. Исходным

пунктом сравнения будем считать неизменное значение переменной составляющей тока ротора для всех схем. При анализе учтем, что соотношение между действующим значением переменной составляющей фазного тока ротора $I_{\approx}$ и постоянной составляющей $I_{=}$ для однополупериодной схемы выпрямления характеризуется коэффициентом β_i , значение которого 0,76 для 3-фазных схем и 0,588 – для 5-фазных.

Оценивая параметры обмотки ротора как якорной обмотки возбудителя, вычисляем в итоге величину магнитного потока, необходимую для создания в короткозамкнутой обмотке тока определенной величины ($I_{\approx} = 1,14 \text{ A}$). В ненасыщенной машине при заданной величине напряжения возбуждения возбудителя магнитный поток в воздушном зазоре возбудителя $\Phi_{\delta 1}$ пропорционален мощности возбуждения возбудителя P_f . Поэтому сделать заключение об эффективности каждой из обмоток с точки зрения минимизации мощности возбуждения ВГСТ можно по величине потока.

Необходимо отметить, что такие сильно укороченные в поле возбудителя обмотки обладают большими индуктивностями рассеяния L_{σ} . Это объясняется наличием существенного дифференциального рассеяния, которое в этих обмотках составляет до 95 % от суммарного рассеяния. Коэффициент дифференциального рассеяния в работе определялся графическим методом посредством построения диаграмм Гергерса по методике, изложенной в [3].

Чтобы определить степень использования совмещенной обмотки в магнитном поле генератора, необходимо найти суммарную МДС возбуждения генератора, созданную данной обмоткой:

$$F_{\Gamma=} = I_{=} w_R k_{\Gamma} m_R,$$

где w_R , m_R – число витков фазы и число фаз обмотки ротора;

k_{Γ} – коэффициент формы поля возбуждения генератора.

Этот коэффициент находится как отношение

$$k_{\Gamma} = B_{fm1} / B_{fm},$$

где B_{fm} , B_{fm1} – максимальная индукция и амплитуда основной гармоники поля возбуждения генератора.

Значения коэффициентов формы поля возбуждения находились посредством разложения кривых МДС ($F_{=}$) в тригонометрический ряд Фурье.

Например для обмотки С кривая МДС определена на интервале $[0, 2\pi]$ следующим образом:

$$F_{=}(\alpha) = \left\{ \begin{array}{l} 0; 11\pi/6 < \alpha < \pi/6 \\ 1; \pi/6 < \alpha < 5\pi/6 \\ 0; 5\pi/6 < \alpha < 7\pi/6 \\ -1; 7\pi/6 < \alpha < 11\pi/6 \end{array} \right\}.$$

Значение коэффициента разложения первой гармонической или коэффициента формы поля возбуждения генератора

$$b_1 = k_{fT} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F_{\pm}(\alpha) \sin \alpha d\alpha = \frac{1}{\pi} \left\{ \left(\cos \frac{\pi}{6} \right) - \left(\cos \frac{5\pi}{6} \right) + \left(-\cos \frac{7\pi}{6} \right) - \left(\cos \frac{11\pi}{6} \right) \right\} = 1,103.$$

Для сравнения обмоток по обоим показателям одновременно (P_f и $F_{T=}$) введем понятие фиктивного коэффициента усиления возбудителя $k = \frac{F_{T=}}{P_f}$.

Ниже приведены результаты расчета эффективности использования совмещенных обмоток ротора в магнитных полях возбудителя и генератора.

Таблица 2

Параметры электрически совмещенных обмоток

Параметр	Обозначение	Вид обмотки					
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
Число витков в фазе	w_R	99	99	66	51	51	34
Обмоточный коэффициент в поле возбудителя	k_{ov}	0,5	0,483	0,342	0,309	0,305	0,208
Индуктивное сопротивление реакции якоря, Ом	x_a	5,737	5,576	1,243	1,010	0,984	0,203
Индуктивное сопротивление рассеяния, Ом	x_{σ}	6,921	1,051	0,277	1,108	0,601	0,049
Активное сопротивление фазы, Ом	r_a	0,956	0,956	0,637	0,306	0,306	0,204
Магнитный поток в зазоре возбудителя, Вб×10 ⁻⁴	$\Phi_{\delta 1}$	3,287	1,797	0,937	1,742	1,330	0,586
Мощность возбуждения возбудителя, Вт	P_f	55,24	30,20	15,75	29,28	22,35	9,85
Коэффициент кривой поля возбуждения генератора	k_{fT}	1,273	0,900	1,103	1,273	0,900	1,103
Полная МДС генератора, А	$F_{T=}$	567,1	401,0	327,6	629,3	445,0	363,6
Коэффициент усиления	k	10,2	13,3	20,8	21,5	19,9	36,9

Анализируя данные табл. 1 и 2 и исключая из сравнения обмотку *F*, так как ширина зубца при $z_R = 30$ находится на грани допустимой по механической прочности, можно сделать следующие выводы:

- пятифазные обмотки ротора требуют меньшую мощность возбуждения возбудителя P_f по сравнению с трехфазными, имеющими такое же распределение (сравниваем обмотки *A – D*, *B – E*, *C – F*);
- пятифазные обмотки создают большую МДС возбуждения генератора;
- максимальный и примерно одинаковый коэффициент усиления имеют обмотки *C*, *D*, *E*;
- полное число витков *m*-фазной обмотки $w = m_R \cdot w_R$, а следовательно и расход обмоточного провода минимальны у обмотки *C*.

Из результата анализа следует, что для бесщеточного возбуждения вентильного генератора совмещенного типа предпочтительны схемы однослойных обмоток *C* ($m = 3$) и *D*, *E* ($m = 5$).

1. *Зубков Ю.В., Тулупов П.В.* Моделирование электромагнитных процессов вентильного генератора совмещенного типа / Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 52-54.
2. *Зубков Ю.В., Фельзинг А.П.* Некоторые аспекты проектирования обмоток ротора бесщеточных генераторов / Разработка и исследование специальных электрических машин: Сб. науч. тр. – Куйбышев, 1987. – С. 136-147.
3. *Геллер Б., Гамата В.* Высшие гармоники в асинхронных машинах / Пер. с англ. под ред. З.Г. Каганова. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2012 г.

EFFICIENCY ELECTRICLY COMBINED SHORT-CIRCUITED WINDING OF VENTIL GENERATOR

Y. V. Zubkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

Various schemes of single-layer electrically combined rotor windings of the ventil generator are considered. The analysis of efficiency of their use in magnetic fields of the exciter and the generator is carried out. The conclusion on preference of windings is drawn.

Keywords: *ventil generator, electricly combined winding.*