

УДК 621.313  
Н 74

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ОБМОТКИ РОТОРА БЕСКОНТАКТНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С СОВМЕЩЕННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

С. Н. Новогрецкий, канд. техн. наук, и.о. доцента кафедры СЭЭС

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Рассмотрены схемы обмоток ротора бесконтактного синхронного генератора с совмещенной магнитной системой. Проведено сравнение энергетических показателей обмоток ротора при совмещении и разделении функций обмоток якоря возбудителя и индуктора генератора. Показаны более высокая компактность размещения и повышенные значения потерь на возбуждение при совмещенной конструкции обмотки ротора.

**Ключевые слова:** бесконтактный синхронный генератор, обмотка ротора.

**Анотація.** Розглянуто схеми обмоток ротора безконтактного синхронного генератора зі сполученою магнітною системою. Проведено порівняння енергетичних показників обмоток ротора при сполученні і розподілі функцій обмоток якоря збудника й індуктора генератора. Показано більш високу компактність розміщення і підвищені значення втрат на збудження при сполученій конструкції обмотки ротора.

**Ключові слова:** безконтактний синхронний генератор, обмотка ротора.

**Abstract.** The schemes of rotor windings of brushless synchronous generator with combined magnetic system are considered. The comparison of energy factors of rotor windings is carried out when the function of exciter armature winding and the function of generator inductor winding are combined and separated. The higher compactness of placing and the increased values of excitation losses under the combined rotor winding construction are shown.

**Keywords:** brushless synchronous generator, rotor winding.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Бесконтактные системы возбуждения синхронных генераторов являются одним из наиболее приоритетных направлений развития в электроэнергетике, так как их применение позволяет повысить надежность эксплуатации генерирующего элемента, а значит, и энергосистемы в целом. Обычно бесконтактная система возбуждения представляет собой отдельный обращенный синхронный генератор (далее возбудитель), расположенный на валу основной машины и производящий бесконтактную передачу электроэнергии со статора на ротор. При этом обмотка якоря возбудителя соединена с обмоткой возбуждения основного генератора посредством вращающегося на том же валу выпрямителя. Однако данную конструкцию можно преобразовать, совместив магнитные системы возбудителя и основной машины, что позволит резко уменьшить длину генератора в целом.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для совмещения магнитных систем возбудителя и основной машины необходимо обеспечить магнитную развязку обмоток обеих машин, чего можно добиться, выбрав количество пар полюсов возбудителя  $p_2$  и основного генератора  $p_1$ , таким образом, чтобы  $p_1$  и  $p_2$  принадлежали разным рядам (нечетному  $p = 6m \pm 1$ , четному  $p = 6m \pm 2$ , кратному трем  $p = 3m$ , где  $m = 0, 1, 2, \dots, +\infty$ ) [2]. Но после объединения

магнитных систем возник вопрос о возможности совмещения функций обмоток якоря возбудителя и возбуждения основного генератора в одной. Достаточно детальный анализ таких конструктивных решений предлагается в работах [1, 3]. Однако попытка спроектировать бесконтактный синхронный генератор с совмещенной магнитной системой привела к большому количеству вопросов о границах применения имеющихся конструктивных решений обмотки ротора.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** – сравнить энергетические показатели обмоток ротора бесконтактного генератора с совмещенной магнитной системой при совмещении и разделении функций обмоток якоря возбудителя и индуктора генератора.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для начала проанализируем конструктивное решение размещения обмоток ротора, предложенное в работе [1]. В соответствии с ним соотношение пар полюсов возбудителя и основного генератора выбрано 3:1. При этом выбрана однослойная обмотка, равномерно уложенная по окружности ротора с шагом, равным полюсному делению основного генератора или трем полюсным делениям возбудителя. В результате получается девять групп обмоток (по три группы на каждую фазу возбудителя), которые соединяются по схеме, представленной на рис. 1.

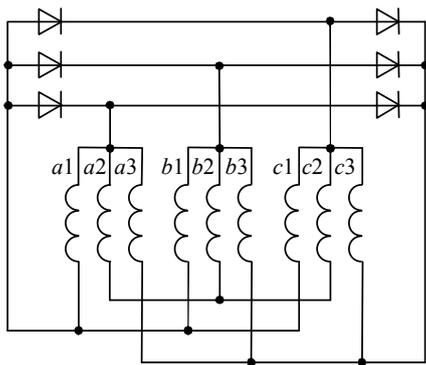


Рис. 1

Схема соединения обмоток, предложенная в работе [1], очень интересна как с точки зрения коммутаций диодов выпрямителя, так и с точки зрения совмещения в одной обмотке двух функций (обмотки якоря возбудителя и обмотки возбуждения основного генератора). Приведенная схема обеспечивает кроме протекания переменного тока по обмоткам также протекание постоянного тока последовательно по первой и третьей группам каждой фазы.

Чтобы это более наглядно продемонстрировать, на рис. 2 представлена схема такой обмотки при количестве пазов на роторе  $z_2 = 18$ , количестве полюсов возбудителя  $2p_2 = 6$  и полюсов генератора  $2p_1 = 2$ .

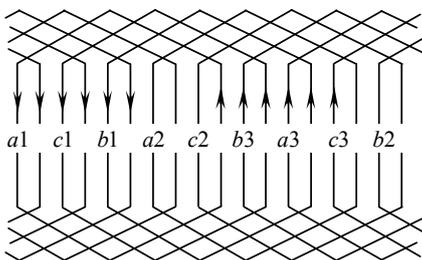


Рис. 2

Латинскими буквами указаны фазы якоря возбудителя, а стрелками – направление постоянного тока возбуждения основного генератора. Как видно из рис. 2, предложенная схема соединения (см. рис. 1) действительно позволяет получить две независимые магнитные системы с помощью одной общей обмотки.

Однако интересен вопрос энергетических соотношений в предложенной схеме. Для его анализа в среде Multisim была собрана эквивалентная электрическая схема замещения, в которой каждая группа обмоток заменялась последовательно соединенным источником напряжения  $E$  с соответствующим фазовым сдвигом и активным сопротивлением  $R$ . Индуктивным сопротивлением рассеяния обмотки было решено пренебречь для упрощения анализа схемы.

Для эквивалентной схемы при  $E = 100$  В и  $R = 1$  Ом были получены следующие результаты:

а) величина постоянного тока, протекающая через первую и третью группы обмоток  $I_{c1=} = 58,5$  А;

б) величина переменного тока, протекающая через первую и третью группы обмоток  $I_{c1\sim} = 50$  А;

в) величина переменного тока, протекающая через вторую группу обмоток  $I_{c2\sim} = 48$  А;

г) величина активных потерь на переменном токе  $P_{c\sim} = 21,9$  кВт;

д) величина активных потерь на постоянном токе  $P_{c=} = 20,5$  кВт.

Как видим из полученных данных, вторая группа обмоток с точки зрения выделения тепла недогружена по току на 60 %, а потери на постоянном токе приблизительно равны сопутствующим потерям на переменном токе.

Для того чтобы оценить полученные результаты, рассмотрим такую же схему обмотки, но без совмещения функций обмотки возбуждения генератора и обмотки якоря возбудителя. Этого легко добиться, если включить последовательно первую и третью группы и убрать узлы соединения со второй группой обмоток в каждой фазе, как показано на рис. 3. В электромагнитном плане обе обмотки независимы, так как переменные ЭДС в первой и третьей группах обмоток направлены встречно и компенсируют друг друга. Таким образом, по первой и третьей группам обмоток будет протекать только постоянный ток и эти группы будут выполнять исключительно функции обмотки возбуждения основного генератора.

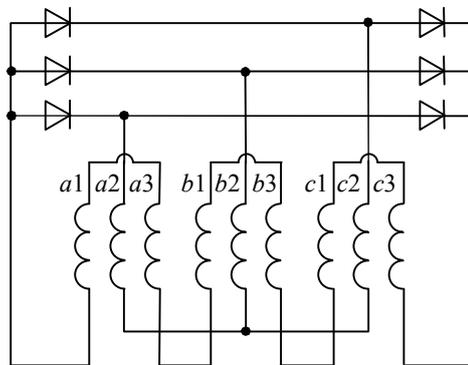


Рис. 3

В среде Multisim была рассмотрена эквивалентная схема замещения и этого способа соединения обмоток. В результате при  $E = 100$  В и  $R = 1$  Ом были получены следующие данные:

а) величина постоянного тока, протекающая через первую и третью группы обмоток  $I_{н1=} = 29,2$  А;

б) величина переменного тока, протекающая через вторую группу обмоток  $I_{н2\sim} = 23,5$  А;

в) величина активных потерь на переменном токе  $P_{н\sim} = 1,66$  кВт;

г) величина активных потерь на постоянном токе  $P_{н=} = 5,16$  кВт.

Как видим из полученных данных, вторая группа обмоток с точки зрения выделения тепла недогружена по току на 26 %, а потери на постоянном токе при-

близительно в 3 раза больше потерь на переменном токе.

На первый взгляд может показаться абсолютное превосходство в отношении энергетических показателей схемы, изображенной на рис. 3. Однако необходимо помнить, что система возбуждения в первую очередь должна обеспечивать заданный уровень намагничивающей силы возбуждения основного генератора  $F_m$ .

Предположим, что геометрия ротора и сечение провода  $S$  в обоих случаях одинаковы. Тогда намагничивающая сила возбуждения пропорциональна произведению количества витков одной группы обмоток  $w_1$  и постоянного тока  $I_f$  в этой обмотке:

$$F_m \sim w_1 I_f. \quad (1)$$

Очевидно, что  $I_f$  пропорционален следующему соотношению:

$$I_f \sim \frac{E_1 w_1}{R_1} \sim \frac{B_{\delta 2} w_1}{R_1} \sim \frac{B_{\delta 2} w_1}{\rho_{Cu} l_1 w_1} S \sim B_{\delta 2}, \quad (2)$$

где  $E_1$  – переменная ЭДС, наводимая в одном витке потоком возбуждения возбuditеля;  $R_1$  – активное сопротивление одной группы обмоток;  $l_1$  – длина одного витка обмотки;  $\rho_{Cu}$  – удельное сопротивление меди;  $B_{\delta 2}$  – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, созданное полем возбуждения возбuditеля.

Таким образом, изменение количества витков не влияет на ток возбуждения при сохранении постоянства сечения провода. Положив геометрию паза в обеих схемах одинаковой и учитывая одинаковые сечения эффективных проводников, приходим к выводу, что для обеспечения одинаковых намагничивающих сил возбуждения необходимо в первой схеме уменьшить  $B_{\delta 2}$  в 2 раза. В результате для эквивалентной схемы исходные данные изменятся следующим образом:  $E = 50$  В и  $R = 1$  Ом. Тогда потери активной мощности будут на постоянном токе  $P_{c1=} = 5,08$  кВт и на

переменном токе  $P_{c1-} = 5,38$  кВт, то есть суммарная мощность на возбуждение все равно будет больше на 53 %.

Анализируя формулы (1) и (2), делаем вывод, что можно обеспечить ту же намагничивающую силу, уменьшив количество витков  $w_1$  и, как результат, сечение паза в 2 раза. Однако в этом случае суммарная мощность на возбуждение будет больше на 206 % по сравнению со схемой на рис. 3, что значительно хуже предыдущего результата. Конечно, увеличивая сечение эффективного проводника  $S$  и во столько же уменьшая количество витков  $w_1$ , можно добиться ожидаемого уменьшения потерь на возбуждение, но те же самые манипуляции с тем же эффектом можно сделать и для несомещенной обмотки, поэтому данный способ вариации параметров обмоток не является информативным.

### ВЫВОДЫ

1. При совмещении функций обмоток якоря возбuditеля и возбуждения генератора можно уменьшить в воздушном зазоре значение магнитной индукции возбuditеля и уменьшить сечение паза ротора, что важно при малых значениях диаметра ротора.

2. При совмещении обмоток ротора потери энергии на возбуждение резко возрастают, что приводит к уменьшению КПД машины и увеличению тепловой нагрузки на ротор.

3. При совмещении вторая группа обмоток, по которой протекает только переменный ток, резко недогружена по току по сравнению с первой и третьей группами обмоток. В то же время при отдельной работе обмоток токовая нагрузка практически равномерно распределена по окружности ротора.

4. Совмещение функций обмоток ротора в одной может быть рекомендовано при невозможности выполнения отдельной конфигурации в желаемых геометрических размерах ротора.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Бабушанов, А. В.** Выбор рациональной структуры бесконтактного совмещенного неявнополюсного синхронного генератора [Текст] / А. В. Бабушанов, Н. И. Билоненко, О. Б. Бабийчук // *Електротехнічні та комп'ютерні системи* : зб. наук. праць ОНПУ. – О. : ОНПУ, 2010. – Вип. 1(77). – С. 70–75.
- [2] **Дегтев, В. Г.** Проектирование бесконтактных совмещенных синхронных генераторов [Текст] / В. Г. Дегтев, А. В. Бабушанов // *Електротехніка і електромеханіка* : зб. наук. праць НТУ ХПІ. – Х. : ХПІ, 2008. – Вип. 2. – С. 21–24.
- [3] **Караваяев, В. Т.** Бесконтактный совмещенный синхронный генератор [Текст] / В. Т. Караваяев // *Электричество*. – 1990. – № 11. – С. 17–25.

© С. М. Новогрещкий

Надійшла до редколегії 07.04.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. А. А. Ставинський