

## ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ СОВМЕЩЕННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ЕГО ОБМОТОК

С. Н. Новогрецкий, канд. техн. наук, и. о. доц. каф. СЭЭС;  
А. А. Прудников, магистрант

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Рассмотрена магнитная цепь бесконтактного синхронного генератора с совмещенной магнитной системой. Проведен анализ влияния насыщения магнитной цепи на гармонический состав электродвижущей силы в обмотках переменного тока машины. Предложены конструктивные рекомендации для уменьшения высших гармоник в выходном напряжении и устранения уравнивающих токов между отдельными секциями обмоток.

**Ключевые слова:** бесконтактный синхронный генератор, насыщение, обмотки.

**Анотація.** Розглянуто магнітне коло безконтактного синхронного генератора із суміщеною магнітною системою. Проведено аналіз впливу насичення магнітного кола на гармонічний склад електрорушійної сили в обмотках змінного струму машини. Запропоновано конструктивні рекомендації для зменшення вищих гармонік у вихідній напрузі та усунення зрівняльних струмів між окремими секціями обмоток.

**Ключові слова:** безконтактний синхронний генератор, насичення, обмотки.

**Abstract.** The concept of designing of autonomous unmanned underwater vehicles which considers systematically the requirements to underwater mission, technology, operation, operational characteristics, architectural and construction type and performance characteristics of vehicles has been developed. This concept is based on the needs analysis of the Navy Force of State in unmanned maritime systems.

**Keywords:** autonomous unmanned underwater vehicle, unmanned maritime system, designing concept.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проектирование совмещенной магнитной системы позволяет уменьшить длину бесконтактного синхронного генератора и сохранить преимущества бесконтактных систем возбуждения с синхронными возбудителями. Однако возникают вопросы совмещения двух разных систем обмоток в единой магнитной системе [2, 4]. При проектировании подобной машины для исключения взаимного влияния между обмотками количество пар полюсов основного генератора и возбудителя чаще всего выбирают в соотношении 1:2. В результате на основных гармониках две системы обмоток не влияют друг на друга. В то же время магнитная система имеет тенденцию к насыщению на разных участках в разной степени, что при наличии двух полей разной полярности может сказаться на гармоническом составе электродвижущей силы (ЭДС), наводимой в обмотках переменного тока машин.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Идея совмещенной магнитной системы для бесконтактного синхронного генератора не является новой, что отражено в достаточно большом количестве публикаций на данную тематику. Однако при рассмо-

тении насыщения магнитной цепи, общей для возбудителя и основного генератора, чаще всего ограничиваются определением характеристики холостого хода генератора с учетом наложения полей обеих машин [1, 2, 4]. Хотя системы обмоток машин магнитно связаны за счет правильного выбора соотношения полюсов и схем самих обмоток, их поля возбуждения двигаются друг относительно друга с синхронной скоростью, в результате чего насыщение под полюсами будет изменяться во времени. Вполне вероятно, что при угловом приращении под полюсами обеих машин будет изменяться магнитный поток, а значит и ЭДС, наводимая в обмотках якоря.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** – проанализировать влияние насыщения на гармонический состав ЭДС в обмотках переменного тока в бесконтактном синхронном генераторе с совмещенной магнитной системой при соотношении пар полюсов основного генератора и возбудителя как 1:2.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для начала определим конструктивные особенности рассматриваемого генератора. При выбранном соотношении полюсов машин высшие гармоники поля возбуждения возбудителя не смогут повлиять на ЭДС якоря основной машины, поскольку они для

ее системы обмоток будут четные. Влияние гармоник поля возбуждения основного генератора на ЭДС обмотки якоря возбудителя, во-первых, незначительно, а во-вторых, не столь важно, так как через вращающийся выпрямитель эта обмотка обеспечивает питание обмотки возбуждения генератора и гармонический состав подводимого к выпрямителю напряжения, не влияя на коэффициент несинусоидальности выходного напряжения генератора. Следует также отметить, что для уменьшения несинусоидальности распределения кривой намагничивания и обеспечения единой геометрии всех пазов ротора обмотку возбуждения предлагается разместить в два слоя равномерно по всей поверхности ротора с таким укорочением шага, чтобы на одной трети полюсного деления намагничивающая сила не изменялась (токи в двух слоях проводников одного паза протекают в противоположные стороны). Таким образом, в кривой распределения поля возбуждения основной машины будут отсутствовать гармоники, кратные трем, и четные гармоники.

Теперь перейдем непосредственно к вопросу влияния насыщения магнитной системы на ЭДС обмоток переменного тока. Для его исследования сделаем следующие предположения. Во-первых, амплитуды магнитодвижущей силы возбуждения возбудителя и основного генератора соотносятся как 1:2. Во-вторых, в воздушном зазоре присутствуют только основные гармоники полей возбуждения обеих машин. В-третьих, зависимость индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  от суммарной намагничивающей силы  $F_\Sigma$  в данном сечении определяется уравнением

$$B_\delta = 1,23 \arctg(0,97 F_\Sigma),$$

где  $B_\delta$  и  $F_\Sigma$  представлены в долях относительно их значений в режиме холостого хода при номинальном напряжении якоря основного генератора. Последнее предположение основано на том, что представленная зависимость соответствует с точностью 5 % нормированной характеристике холостого хода для синхронных генераторов классического исполнения [3].

Положим шаг обмотки диаметральной и рассмотрим кривую ЭДС, которая будет наводиться в обмотку

якоря основного генератора. Относительно нее синусоида поля возбуждения возбудителя неподвижна, а синусоида поля возбуждения генератора вращается с синхронной угловой частотой  $\omega_s$ . Тогда распределение намагничивающей силы по плоскости обмотки будет определяться уравнением

$$F_{\Sigma 1}(\Theta, t) = F_2 \sin(2\Theta + \Theta_{\text{нач}}) + F_1 \sin(\omega_s t + \Theta),$$

где  $F_1, F_2$  – амплитуды намагничивающих сил обмоток возбуждения соответственно возбудителя и генератора;  $\Theta$  – угловая координата смещения от начала обмотки;  $\Theta_{\text{нач}}$  – угловое смещение систем обмоток друг относительно друга.

Тогда распределение магнитной индукции по плоскости обмотки якоря генератора

$$B_{\delta 1}(\Theta, t) = 1,23 \arctg(0,97 F_{\Sigma 1}(\Theta, t)).$$

Магнитный поток, пронизывающий плоскость обмотки,

$$\Phi_{\delta 1}(n, t) = \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} B_{\delta 1}(\Theta, t) d\Theta,$$

где  $n$  – порядковый номер секции обмотки якоря.

Электродвижущая сила, наводимая в обмотку якоря генератора,

$$E_1(n, t) = -d\Phi_{\delta 1}(n, t)/dt.$$

На рис. 1 представлены кривые ЭДС, наводимые в первой и второй секциях обмотки, а также разность этих сил. Кривые выражены в долях относительно амплитуды ЭДС при ненасыщенной магнитной системе, что позволяет в процентном соотношении оценить влияние насыщения на гармонический состав. Также при расчете предполагалось, что  $F_1 = 0,8$  о. е. и  $F_2 = 0,2$  о. е.

Как видно из рисунка, в кривой ЭДС присутствует явно выраженная вторая гармоника. Если пренебречь насыщением, то вторая гармоника исчезает. Таким образом, появление второй гармоники связано исключительно с насыщением магнитной цепи. Для ее удаления из кривой ЭДС необходимо соседние

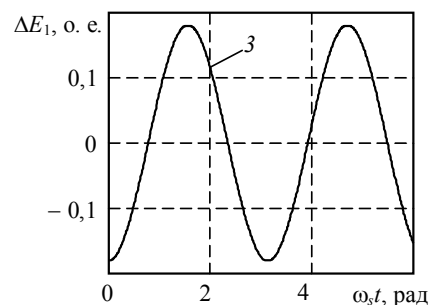
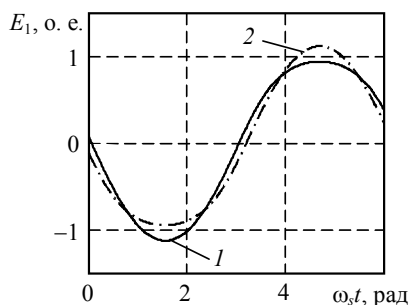


Рис. 1. Влияние насыщения на форму ЭДС обмотки якоря основного генератора при совмещении магнитных систем: 1 –  $E_1(0, t)$ ; 2 –  $[-E_1(1, t)]$ ; 3 –  $\Delta E_1 = [E_1(0, t) + E_1(1, t)]$

секции включить последовательно и встречно, и ни в коем случае не включать их параллельно для предотвращения уравнильных токов между секциями. Отсюда также следует вывод о конструкции самой обмотки, в соответствии с которым она может быть или двухслойной, или однослойной вразвалку.

Аналогичный анализ был проведен и для обмотки якоря возбудителя. В результате было обнаружено следующее влияние насыщения на форму ЭДС, индуктируемую в секции данной обмотки. Во-первых, насыщение приводит к возникновению второй гармоники в ЭДС. Во-вторых, основная гармоника ЭДС, наводимая в четыре соседние секции обмотки, получает разный фазовый сдвиг. Для компенсации первого явления можно последовательно соединить две соседние секции, принадлежащие одному полюсу фазы (например, секции с порядковыми номерами  $n = 1$  и  $n = 3$  или  $n = 0$  и  $n = 2$ ). Второе явление исключает возможность параллельного включения четырех соседних секций из-за возможности возникновения уравнильных токов на основной гармонике. Поэтому группы секций, образованные из четных и не-

четных секций для компенсации первого явления, должны включаться встречно последовательно для компенсации второго явления. Таким образом, количество возможных параллельных ветвей уменьшается в 4 раза, но обмотка может быть выполнена в виде обычной однослойной концентрической.

### ВЫВОДЫ

1. При совмещении магнитных систем основного генератора и возбудителя полюсная развязка их систем обмоток не исключает взаимного влияния этих обмоток при насыщении магнитной системы.

2. Насыщение магнитной системы приводит к возникновению второй гармоники в кривой ЭДС, для компенсации которой определенные секции обмоток попарно должны быть включены последовательно.

3. В обмотке якоря возбудителя насыщение также вызывает возникновение дополнительного фазового сдвига в секциях, принадлежащих одной фазе. Для его компенсации данные секции должны соединяться последовательно.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Бабушанов, А. В.** Исследование магнитных полей бесконтактных синхронных генераторов [Текст] / А. В. Бабушанов // *Электромашинобудування та електрообладнання* : міжвід. наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 70. – С. 76–81.
- [2] **Бабушанов, А. В.** Особенности электромагнитного расчета автономных синхронных совмещенных генераторов [Текст] / А. В. Бабушанов, С. И. Кармалита // *Электромашинобудування та електрообладнання* : міжвід. наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 68. – С. 45–47.
- [3] **Гольдберг, О. Д.** Проектирование электрических машин [Текст] : учебник / О. Д. Гольдберг, И. С. Свириденко ; под ред. О. Д. Гольдберга. – М. : Высш. шк., 2006. – 430 с.
- [4] **Караваев, В. Т.** Бесконтактный совмещенный синхронный генератор [Текст] / В. Т. Караваев // *Электричество*. – 1990. – № 11. – С. 17–25.

© С. М. Новогрецький, А. О. Прудников

Надійшла до редколегії 29.04.13

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

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2013