

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ

В.В. Магин, М.Б. Панасюк

*Рассматриваются особенности проектирования маломощных синхронных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением при работе на выпрямитель. Показано, что конструкция статора оказывает существенное влияние на уровни гармонических составляющих поля в зазоре, которые приводят к пульсациям электромагнитного момента и, следовательно, к повышенным вибрациям электрической машины. Исследована зависимость пульсаций электромагнитного момента от числа фаз электрогенератора с возбуждением от постоянных магнитов при работе на выпрямитель. Исследования проводились в программе конечно-элементного моделирования электромагнитных полей. Даны рекомендации по снижению пульсаций момента синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов. Приведена зависимость добавочных потерь синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в зависимости от отношения зазора к ширине раскрытия паза и выбрана оптимальная конструкция.*

**Ключевые слова:** маломощные синхронные генераторы, пульсации момента, постоянные магниты, добавочные потери.

В настоящее время в РФ большое внимание уделяется разработке и созданию систем электродвижения (СЭД) кораблей. В таком корабле «пар» полностью заменён силовой электромеханикой. Целью создания «электрического» корабля является повышение его тактико-технических характеристик.

СЭД, как правило, состоит (рис.1) из высокоскоростного турбогенератора (ТГ), преобразователя частоты (ПЧ), гребного электродвигателя (ГЭД). Высокоскоростной турбогенератор преобразует механическую энергию паровой турбины, к которой он присоединён, в электрическую энергию. На выход генератора подсоединяется ПЧ с системой автоматического управления. Данный ПЧ является непосредственным источником питания гребного электродвигателя (ГЭД), а также выполняет функции управления динамическими характеристиками ГЭД. Гребной электродвигатель представляет собой синхронную электрическую машину с возбуждением от постоянных магнитов, на валу которой находится винт корабля.

На данный момент в качестве источника электроэнергии на морских судах используются синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением производства ОАО «Силовые машины», мощностью 3,5 МВт при частоте вращения 3000 об/мин, габариты 3115×1975 мм. Такой тип электрической машины имеет ряд недостатков, связанных с обмоткой возбуждения. В первую очередь это потери в роторе на возбуждение электрической машины, которые требуют непосредственного охлаждения. Для охлаждения ротора используется вода, которая создаёт дисбаланс ротора турбогенератора на ос-

новной частоте вращения, что приводит к повышенному уровню вибраций. Кроме того водяное охлаждение ротора, приводит к необходимости установки сальников, которые имеют малые ресурсы и требуют периодических регламентных работ, что в целом снижает надёжность и усложняет конструкцию генератора.

Основными техническими требованиями, предъявляемыми к турбогенераторам морских судов, являются:

- обеспечение низких уровней шумов и вибраций;
- обеспечение высоких показателей надёжности;
- достижение минимально возможных массогабаритных показателей.

Применение синхронных электрических машин с постоянными магнитами в качестве турбогенераторов позволяет создавать высокоскоростные электрические машины с хорошими массогабаритными и виброшумовыми характеристиками, а следовательно избежать описанных выше проблем и достичь заданных технических требований.

В работе рассматриваются особенности проектирования высокоскоростного турбогенератора мощностью 3,5 МВт и частотой вращения 12000 об/мин, габаритные размеры 1700×900 мм.

Уровень электромагнитных вибраций электрической машины определяется величиной вибровозмущающих сил и податливостью системы. Для снижения вибровозмущающих сил требуется снижение амплитуд гармонических составляющих магнитного поля в зазоре электрической машины, которые определяются конструкцией статора и ротора.

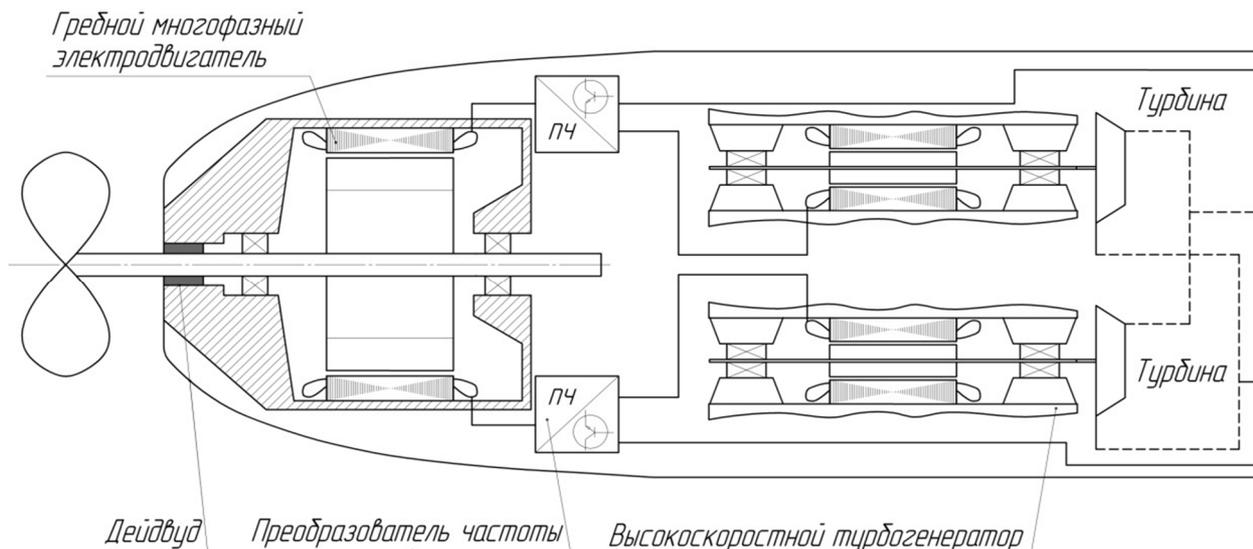


Рис. 1. Структурная схема СЭД

Работа высокоскоростного генератора в составе системы электродвижения из-за высокой частоты генерируемого тока невозможна без преобразователя частоты, включённого между нагрузкой и самим генератором. Преобразователь частоты в исследуемой схеме СЭД представляет собой последовательно соединённые выпрямитель и инвертор. При работе трёхфазного генератора, на выход которого подключён выпрямитель, ток в обмотке якоря сильно несинусоидален (в основном это 5, 7, 11 и 12-я гармоники тока). Несинусоидальный ток якоря создаёт высшие гармонические составляющие МДС обмотки статора и соответствующие им высшие составляющие поля в зазоре генератора, что

в итоге приводит к пульсациям электромагнитного момента генератора, а значит и к появлению повышенного уровня шумов и вибраций. На рис. 2 представлена модель исследуемого турбогенератора. Электромагнитный момент такого генератора имеет значительные пульсации (рис. 3), что подтверждается разбиением полученной кривой в ряд Фурье (рис. 4). Пульсации момента на частоте 1800 Гц составляют 7% от номинального. Вибрации генератора при таких пульсациях составляют около 66 дБ и значительно превышают допустимый уровень. В связи с высоким уровнем вибраций генератора было проведено исследование особенностей проектирования статоров малозумных синхронных машин с постоянными магнитами при работе на выпрямитель. Исследования проводились в программе конечно-элементного динамического моделирования электромагнитных полей.

Таблица 1

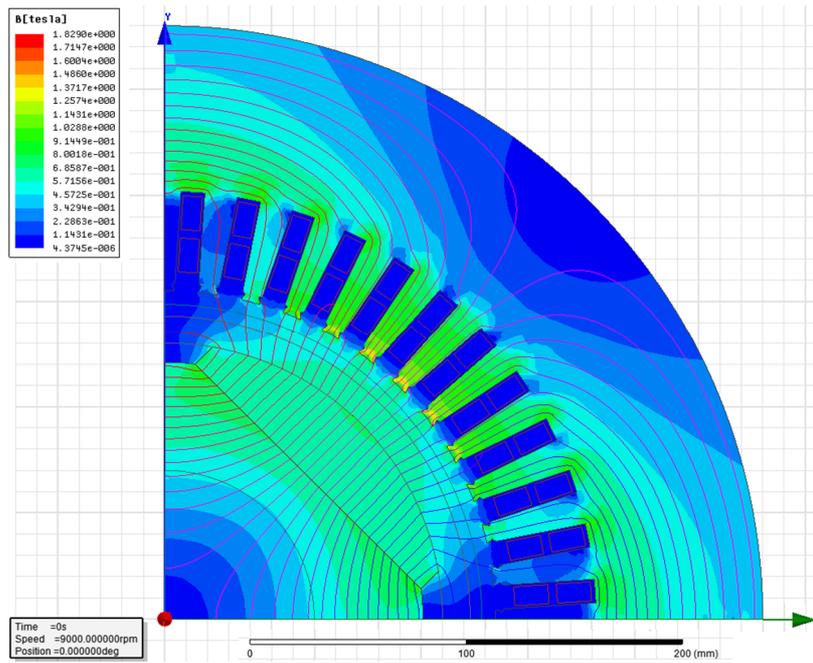
Зависимость пульсаций электромагнитного момента от числа фаз турбогенератора

| Число фаз | Амплитуда гармоники электромагнитного момента, % |                |       |      |       |
|-----------|--|----------------|-------|------|-------|
|           | 6  | 12             | 18    | 24   | 30    |
| 3         | 7  | 1,5            | 0,57  | 0,27 | 0,16  |
| 6         | 0  | 1,5<br>(0,74)* | 0,01  | 0,24 | 0,006 |
| 9         | 4,45   | 1,5            | 0,16  | 0,11 | 0,09  |
| 12        | 0  | 0              | 0,012 | 0,22 | 0,007 |

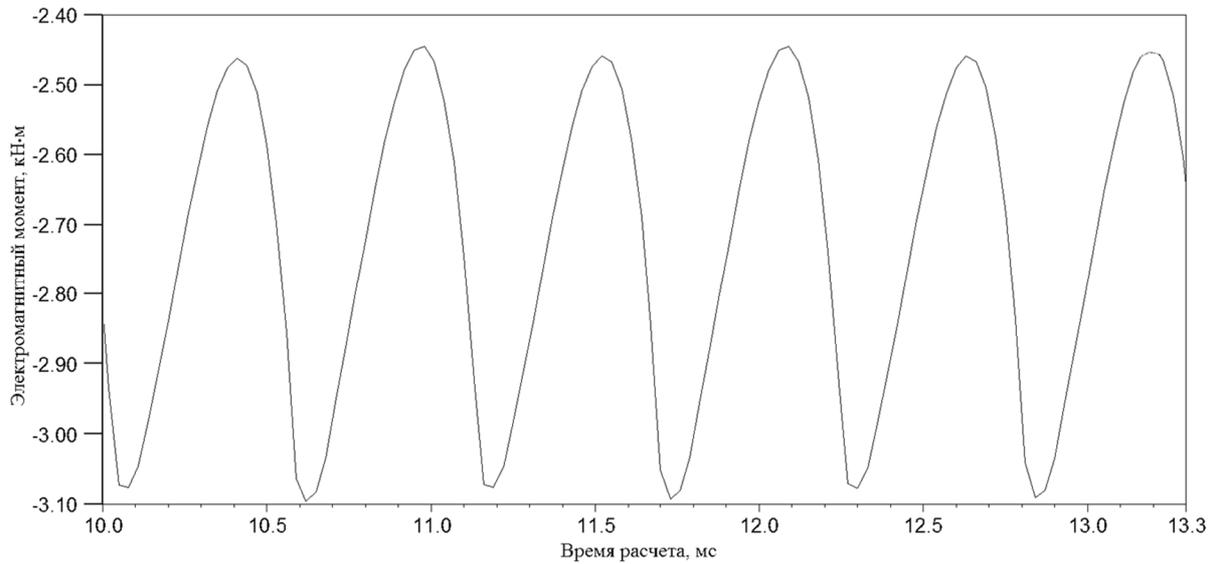
\*Значение в скобках соответствует минимально возможному значению пульсаций момента при оптимизации относительной полюсной дуги постоянных магнитов, равной 0,8 о. е.

Увеличение числа фаз, а именно разбиение обмотки на две или четыре трёхфазные обмотки, сдвинутые на 15 и 7,5 эл. град соответственно, значительно улучшает форму кривой электромагнитного момента, исключая из спектра гармоники кратные числу фаз.

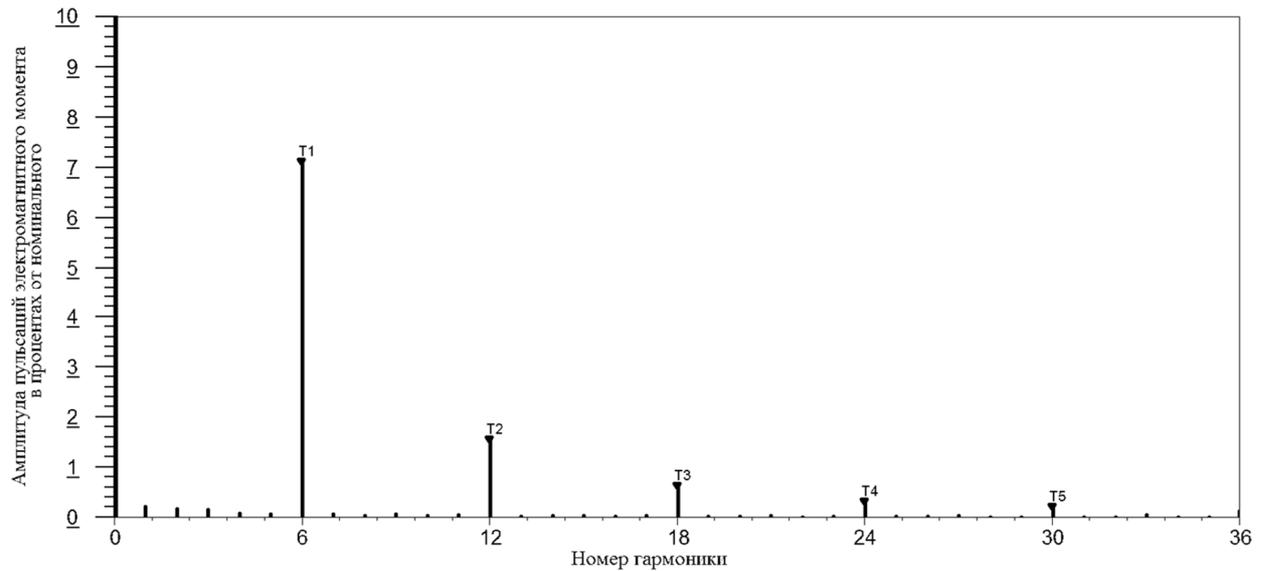
Результаты моделирования турбогенератора с различным числом фаз приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что при применении обмотки статора с четырьмя трёхфазными обмотками статора, соединёнными в «звезду», сдвинутыми на 7,5 эл. град, пульсации момента на значимых частотах, от 0 до 10000 Гц, при несущей частоте 300 Гц, практически отсутствуют. Электромагнитный момент и его гармонический состав представлены на рис. 5 и 6 соответственно.



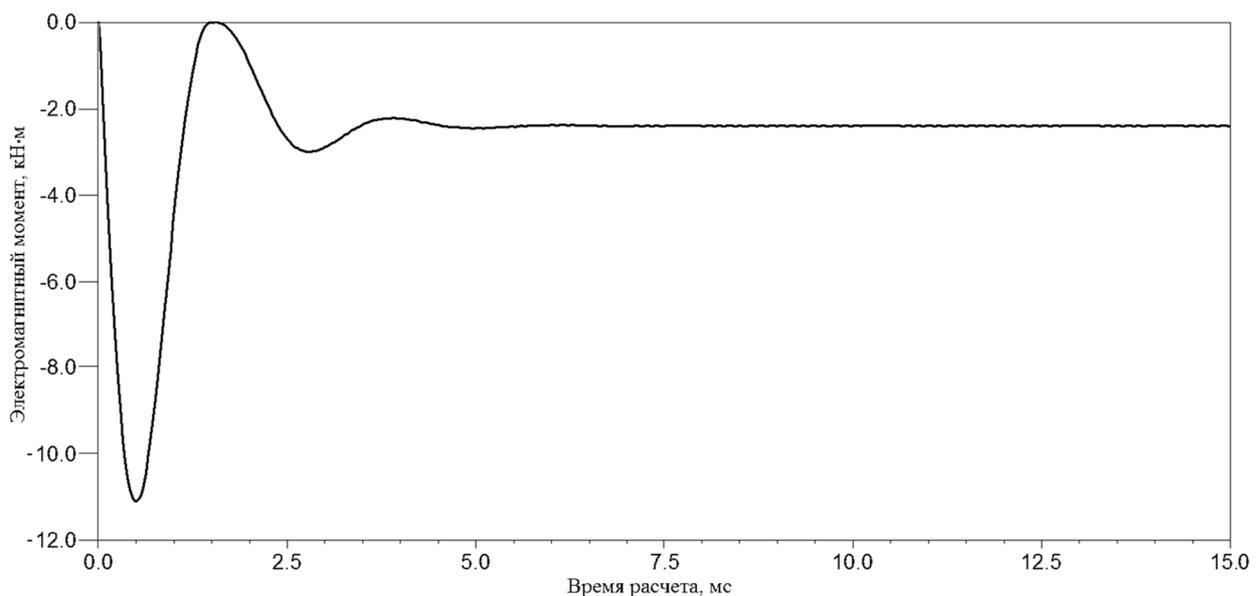
**Рис. 2. Конечно-элементная модель турбогенератора с постоянными магнитами 3,5 МВт, 12000 об/мин**



**Рис. 3. Электромагнитный момент генератора с трёхфазной обмоткой статора при работе на выпрямитель**



**Рис. 4.** Гармонический состав электромагнитного момента турбогенератора в процентах от номинального при трёхфазной системе статора



**Рис. 5.** Электромагнитный момент генератора с двенадцатифазной обмоткой статора при работе на выпрямитель

Другой важной проблемой создания генераторов для системы электродвижения является проблема надёжности, связанная со сложной конструкцией охлаждения ротора.

Высокие обороты генератора при достаточно большой мощности накладывают жёсткие требования по конструкционным материалам. Ротор генератора должен выдерживать центробежные нагрузки и иметь малые значения перемещений под действием этих нагрузок. Наиболее подходящими материалами для бандажа ротора являются

высокопрочные нержавеющие стали и титановые сплавы [2].

Наличие металлической гильзы на роторе турбогенератора накладывает ряд особенностей на его расчёт и выбор основных размеров и параметров. Влияние гильзы на рабочие свойства двигателя определяется наличием добавочных потерь в металлической гильзе ротора от зубцовых гармоник и гармоник тока, создаваемых выпрямителем. Конструкция генератора должна быть такой, при которой потери в бандаже ротора минимальны.

В работе исследована зависимость добавочных потерь турбогенератора в зависимости от зазора.

В качестве параметра, влияющего на величину потерь выбрано отношение величины физического зазора к ширине раскрытия паза  $k_{bn}$ . По результатам моделирования генератора с различным значением зазора был получен график зависимости добавочных потерь от  $k_{bn}$  (рис. 6). Из рисунка видно, что при значении  $k_{bn} > 0,7$  значения добавочных потерь являются незначительными (меньше 0,1% от номинальной мощности генератора).

Также была исследована зависимость добавочных потерь от числа фаз генератора при работе на активную нагрузку и выпрямитель. Результаты исследования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Добавочные потери ротора при работе генератора на активную нагрузку и выпрямитель, при  $k_{bn} = 0,7$

| Число фаз | Добавочные потери, Вт |             |
|-----------|-----------------------|-------------|
|           | Активная нагрузка     | Выпрямитель |
| 3         | 790                   | 3862        |
| 6         | 790                   | 1276        |
| 12        | 790                   | 1052        |



Рис. 6. Добавочные потери турбогенератора в зависимости от  $k_{bn}$

Из таблицы видно, что увеличение числа фаз значительно снижает добавочные потери генератора при работе на выпрямитель. Это объясняется улучшением гармонического состава электромагнитного поля в зазоре с увеличением фаз обмотки статора.

### Заключение

В результате исследования можно сделать следующие выводы.

Чтобы получить наилучшие массогабаритные показатели генератора необходимо применять высокоскоростные синхронные электрические машины с постоянными магнитами.

Для снижения пульсаций электромагнитного момента и снижения уровня вибраций в целом, при работе на выпрямитель необходимо применять четыре трёхфазные обмотки статора, сдвинутые на 7,5 эл. град относительно друг друга;

Высокие показатели надёжности генератора можно обеспечить, избежав применения сложной системы охлаждения ротора. Для этого необходимо чтобы добавочные потери были минимальны и могли быть отведены естественным путём. Этого можно добиться при отношении зазора к ширине раскрытия паза не менее 0,7.

Выполненная работа по исследованию возможности создания мощного высокоскоростного турбогенератора, а именно по моделированию электромагнитных и механических процессов турбогенератора, позволила разработать концепцию проектирования малошумных высокоскоростных генераторов для систем электродвижения.

### Литература

- Макриденко Л. А., Сарычев А. П., Коварский М. Е., Магин В. В. Электрические машины для специальных применений // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2008. – Т. 107. – С. 16 – 21.
- Голованов Д. В., Коварский М. Е., Магин В. В., Трунов И. Г. Методы расчёта высокоскоростных генераторов газотурбинных установок // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2012. – Т. 126. – № 1. – С. 3 – 8.

Поступила в редакцию 01. 09. 2015

*Вячеслав Валерьевич Магин, начальник лаборатории.  
Максим Борисович Панасюк, инженер.  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ».  
Т.: (495) 365-26-14, e-mail: magin@rambler.ru.*

## STRUCTURAL FEATURES OF THE HIGH-SPEED SYNCHRONOUS GENERATORS WITH PERMANENT MAGNETS INTENDED FOR OPERATION WITHIN THE ELECTRIC PROPULSION SYSTEM

V.V. Magin, M.B. Panasyuk

*This article revises the designing features of the low-noise synchronous generators with electromagnetic excitation under operation via the rectifier. It is demonstrated that the stator design has a major impact on harmonic component levels in the clearance which leads to electromagnetic torque pulsations and, therefore, to the electrical machine elevated vibrations. Research has been made regarding the dependence of the electromagnetic torque pulsation from the number of phases of the electric generator with excitation from permanent magnets when operating via the rectifier. Research has been performed within the electromagnetic fields FE modeling program. Recommendations are given regarding the torque pulsation reduction of the synchronous motors with excitation from permanent magnets. Dependence of stray losses of the synchronous generator with excitation from permanent magnets from clearance size to channel opening width ratio has been demonstrated, and optimal design has been selected.*

**Key words:** Low-noise synchronous generators, torque pulsation, permanent magnets, stray losses.

### List of Reference

1. Makridenko L. A., Sarychev A. P., Kovarskiy M. E., Magin V.V. Electrical machines for dedicated applications // Matters of Electromechanics. VNIEM proceedings. – 2008. – T. 107. – Pp. 16 – 21.
2. Golovanov D. V., Kovarskiy M. E., Magin V. V., Trunov I. G. Calculation methods for the high-speed generators of the gas-turbine units // Matters of electromechanics. VNIEM Proceedings. – 2012. – T. 126. – No. 1. – Pp. 3 – 8.

*Viacheslav Valeryevich Magin, Head of laboratory.*

*Maxim Borisovich Panasyuk, Engineer.*

*JC 'VNIEM Corporation'.*

*Tel.: (495) 365-26-14, e-mail: magin@rambler.ru.*