

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НИЗКОБОРОТНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

Повышенный научный и практический интерес к разработке, проектированию, исследованию и внедрению низкооборотных синхронных генераторов на постоянных магнитах вызван необходимостью оснащения и наполнения различных отраслей народного хозяйства эффективными возобновляемыми источниками энергии, основанными на принципах работы ветро-, гидро- и пневмоэнергетики. Толчком творческому мышлению отечественной и зарубежной науки по созданию и внедрению в производство и быт новых видов конструкций магнитоэлектрических машин с возбуждением от постоянных магнитов послужило появление на потребительском рынке широкого ассортимента доступных к использованию высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе редкоземельных элементов из сплава неодим-железо-бор (NdFeB). В данной работе предложена конструкция низкооборотного синхронного генератора на постоянных магнитах, учитывающая в полной мере список требований, предъявляемых к возобновляемым источникам энергии, накопленным практическим опытом создания таких электромеханических преобразователей. Наряду с описанием геометрии в статье приведены результаты математического моделирования магнитного поля низкооборотного синхронного генератора с использованием пакета ANSYS (Maxwell), подтвержденные экспериментальными исследованиями опытного образца.

**Ключевые слова:** конструкция опытного образца низкооборотного синхронного генератора, подковообразные электромагниты с П-образным сердечником и катушками, высококоэрцитивные постоянные магниты в форме дисков, моделирование магнитного поля, режим холостого хода и короткого замыкания синхронного генератора.

Низкооборотные синхронные генераторы с постоянными магнитами (СГПМ) оказывают заметное влияние на развитие альтернативной энергетики. В настоящее время благодаря высоким энергетическим показателям СГПМ, обусловленным ростом их установленной мощности и отсутствием затрат энергии на возбуждение, определены пути развития альтернативной энергетики по использованию возобновляемых источников энергии, какими являются ветроэнергетические установки (ВЭУ), дизельные генераторы, гидрогенераторы и другие [1, 2]. Традиционно возобновляемые источники энергии классифицируются по следующему принципу: солнечная энергия, вода (энергия приливов и отливов, энергия рек), энергия ветра, энергия биомассы, геотермальная энергия. В отличие от других возобнов-

ляемых источников достоинствами ветроэнергетики являются фактическая повсеместность ветра и бесконечность ресурсов, вызванная циклонической деятельностью атмосферы Земли и отсутствие экологических проблем загрязнения окружающей среды. Принцип действия ВЭУ, основанный на преобразовании кинетической энергии ветра в механическую энергию ветродвигателем и последующим ее преобразованием в самом синхронном генераторе в электрическую энергию, позволяет создать единый замкнутый цикл работы низкооборотных СГПМ с другими источниками энергии, например, в паре с дизельными генераторами, солнечными батареями и др. Получение энергии из ветра на постоянной основе является труднодостижимой и приоритетной задачей мировой ветроэнергетики.

Странами — мировыми лидерами с развитой ветроэнергетикой являются Китай, США, Германия, Испания, Индия. Конструкции ВЭУ делятся на два вида принципиально разных устройств, технические решения которых не повторяются, а именно: горизонтально осевые ВЭУ (пропеллерные) и вертикально осевые ВЭУ (роторные) [3–5]. В мире, особенно за рубежом, широкое распространение получили конструкции горизонтально-осевых ВЭУ с двумя или тремя лопастями ветроколеса [6–8]. Условием максимальной их эффективности является постоянная ориентация оси вращения ветроколеса с направлением скорости ветра. Ориентация ветроколеса на ветер при этом обеспечивается механизмами и системой ориентации, включающей в себя датчик ветра, привод, редуктор опорно-поворотный круг с зубчатым зацеплением для поворота гондолы ВЭУ, а также тормозные фиксирующие устройства для удержания головки ВЭУ в требуемом положении. При этом полного совпадения оси вращения ветроколеса с направлением ветра получить не удастся вследствие запаздывания системы ориентации ветроколеса и естественного ветрового потока, в котором крупномасштабная турбулентность приводит к различным направлениям потоков воздуха по длине размаха лопастей ветроколеса. Отличительной особенностью вертикально-осевых ВЭУ является то, что в них практически во всем рабочем диапазоне ветров поддерживается оптимальная быстроходность, при которой реализуется максимальный коэффициент использования энергии ветра. Вертикально-осевые конструкции ВЭУ полностью не зависят от направления движения потока воздуха, в их конструкциях отсутствуют угловая передача крутящего момента и принудительные механизмы для запуска ветроколеса при стартовой скорости ветра 1,5–2 м/с, обеспечивается безопасный для здоровья человека звуковой фон не более 18–20 дБ и благоприятные условия для полета птиц, так как ВЭУ воспринимается пернатыми как единое препятствие, которое можно обогнуть. Вертикально-осевые конструкции ВЭУ имеют противодействие сильным порывам ветра и работают при любых климатических условиях с КПД не ниже 25–28 %. К недостатками вертикально-осевых конструкций относятся большая материалоемкость ВЭУ и существенная их стоимость. Указанные недостатки не принимаются во внимание, когда речь идет об обеспечении электрической энергией территорий, имеющих малую плотность населения, в том числе труднодоступных горных населенных пунктов, военных объектов, фермерских хозяйств, удаленных или не присоединенных к централизованным энергосистемам по экономическим соображениям. В России решение этой важной народнохозяйственной задачи идет по нескольким направлениям, а именно:

— создание мобильных плавучих атомных электростанций малой мощности (ПАТЭС), какой является российский проект первой в мире ПАТЭС «Академик Ломоносов», построенная специально для северного города Певек Чукотского автономного округа для замены небольшой по мощности Библинской АЭС [9];

— освоение возобновляемых источников энергии согласно «Энергетической стратегии России до 2020 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 28 августа 2003 года № 1234-р [10, 11], предусматривающей создание новейших поколений вертикально-осевых ВЭУ, которые мало

изучены и представляют собой большое поле творчества для ученых и специалистов.

Вертикально-осевые ВЭУ при сравнении с горизонтально-осевыми имеют максимальный спектр сфер применения по виду деятельности и климатических зон на всей территории Российской Федерации, а именно: полное или частичное электроснабжение, водоснабжение и отопление небольших поселков, жилых домов, коттеджей, ферм, офисных помещений, малых производственных цехов и мастерских; водоснабжение и очистка от загрязнений, солей; осушение заболоченных участков местности; электропитание световых указателей, осветительных приборов и др. Вертикально-осевые ВЭУ с ротором Дарье получили широкое распространение во многих странах мира, причем в Канаде, США, Нидерландах предпочтение отдается классической схеме с криволинейными лопастями, а в Великобритании, Германии, Индии, Китае и России в качестве основной схемы приняты роторы с прямыми лопастями, параллельными оси вращения. Диапазон мощности таких ВЭУ также расширяется, одновременно с этим растет потребность в создании малых вертикально-осевых ВЭУ, используемых для автономного энергоснабжения мощностью 0,1; 1; 3; 5; 7,5; 10; 15; 30 и 100 кВт. Наблюдается тенденция приближения малых ВЭУ к месту расположения загородного коттеджа, многоэтажного дома, строения или сооружения. Такие решения привлекательны как с технической, так и экономической точки зрения и реализованы в США, Канаде, Европе, Индии, Китае. В России эта тенденция также прослеживается, что подтверждается растущим количеством заявок от потенциальных потребителей на размещение малых ВЭУ. В России работает много предприятий-производителей малых вертикально-осевых ВЭУ, в их число входят: ООО «ГРЦ-Вертикаль», ФГУП Государственный ракетный центр (КБ им. академика В. П. Макеева), ООО «Армада-Плюс», ООО «Промэнерго», НИИ «Уралмет», ООО «Энерджи Дисижн» и др.

При разработке вертикально-осевых ВЭУ применяются различные технические решения по геометрии и конструктивному исполнению низкоборотных СГПМ. Разнообразии предлагаемых разработчиками конструкций синхронных генераторов свидетельствует о трудоемкости поисков оптимальных решений, в которых было бы сочетание заданных технических условий с экономическими параметрами, связанными со снижением массы и габаритов синхронного генератора, низкой стоимостью активных материалов, монтажа, пуска и наладочных работ, ремонта и обслуживания. Определение конструкции СГПМ во многом носит эвристический характер. После этапа конструирования начинается процесс непосредственного проектирования самого синхронного генератора, состоящий из последовательности предварительной и поверочной стадий расчета. На предварительной стадии определяются основные размеры магнитной системы и обмоточные данные генератора методами теории магнитных и электрических цепей. На стадии поверочных расчетов уточняются электромагнитные нагрузки синхронного генератора, основные размеры магнитной системы и обмоточные данные якоря, масса активных материалов, потери и КПД. Указанная последовательность стадий проектирования СГПМ представляет общий подход, характерный для электрических машин различного назначения, который реализуется в предложе-

ниях разработчиков в виде конкретных алгоритмов и программ для ПК. На всех стадиях проектирования должно уделяться особое внимание способам повышения эффективности и надежности работы синхронного генератора. При этом центральное место в решении задачи оптимального проектирования занимает исследование численных моделей магнитных полей с применением метода конечных элементов [12]. По умолчанию при эвристическом поиске оптимальной конструкции СГПМ, находящихся отражение в выработке большого числа патентов и заявок на изобретение, существует нечеткая концепция выбора в магнитной системе одинаковой формы поперечного сечения стальных полюсов и постоянных магнитов. Возможная ошибка принятия решения на этом этапе может иметь негативные последствия как по эффективности работы самого синхронного генератора, так и технологичности его изготовления. Решение электротехнической задачи об индуцированной ЭДС в витке при относительном движении постоянного магнита с различной формой поперечного сечения позволяет предотвратить ошибку при конструировании новых типов СГПМ [13].

Основными критериями, которыми следует руководствоваться для оптимального выбора конструкций СГПМ, являются: незначительный момент срабатывания, самостоятельный старт синхронного генератора при малых ветрах, низкий уровень автоколебаний, ограничение частоты вращения ротора, технологичность изготовления конструкции, монтажа, ремонта и обслуживания синхронного генератора, повышение надежности, удельных энергетических показателей, снижение габаритов и массы активных материалов по сравнению с конструкциями прототипов.

Указанным критериям в модельном ряду ВЭУ мощностью 0,1 – 100 кВт соответствует конструкция низкооборотного СГПМ, предложенная в патенте на изобретение [14].

Магнитная система опытного образца разработанной конструкции низкооборотного СГПМ показана на рис. 1, а его внешний вид — на рис. 2. Из рис. 1 видно, что статор низкооборотного СГПМ содержит электромагниты, каждый из которых имеет П-образный шихтованный магнитопровод (1) и снабжен двумя катушками (2). Ротор СГПМ (подвижная часть) представляет собой индуктор. На роторе находятся двенадцать постоянных магнитов (3) с продольно-поперечной чередующейся полярностью, которые размещены в алюминиевых стаканах (5), снабженных крышками (6). Для создания замкнутого магнитного потока от двух постоянных магнитов, расположенных один под другим, алюминиевые стаканы объединены стальной пластиной (4).

Исследуемый образец предложенной конструкции низкооборотного СГПМ характеризуется следующими параметрами: номинальная мощность  $S_n = 500$  ВА, номинальное напряжение на зажимах обмотки якоря  $U_n = 220$  В (действующее значение), номинальная частота вращения  $n = 400$  об/мин, номинальная частота тока  $f = 20$  Гц, число фаз  $m = 1$ , число пар полюсов  $p = 3$ , число электромагнитов с П-образным шихтованным магнитопроводом  $N = 8$ . Номинальная скорость вращения вала  $n_n = 400$  об/мин. На каждом сердечнике электромагнита находятся две катушки с числом витков  $w = 300$ . В конструкции СГПМ используются высококоэрцитивные постоянные магниты, изготов-

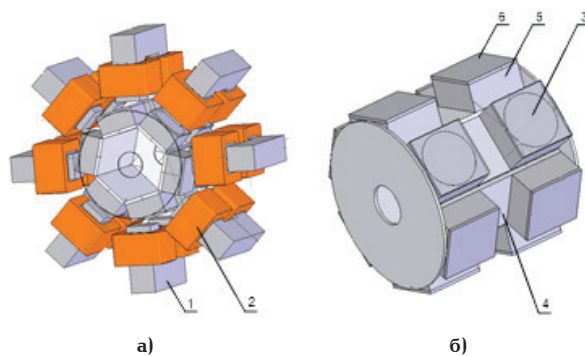


Рис. 1. Магнитная система низкооборотного СГПМ в собранном виде (а) и конструкция ротора/индуктора (б)



Рис. 2. Внешний вид низкооборотного СГПМ

ленные из сплава NdFeB марки  $N = 38$  в форме диска диаметром 55 мм и высотой 25 мм, имеющие аксиальное направление намагничивания, остаточную индукцию  $B_r = 1,2$  Тл, коэрцитивную силу  $H_c = 955$  кА/м и магнитную энергию  $BH_{max} = 300$  кДж/м<sup>3</sup>. Удельное сопротивление и плотность материала постоянного магнита равны соответственно  $\rho_m = 1,4 - 1,45$  Ом м,  $\gamma_m = 7500$  кг/м<sup>3</sup>.

Распределение магнитного поля в магнитной системе низкооборотного СГПМ оказывает существенное влияние на значение ЭДС в витках катушек электромагнитов и реакцию якоря. В связи с этим целесообразным является проведение математического моделирования магнитной системы низкооборотного СГПМ на ПК с использованием программного пакета ANSYS/Maxwell [15]. Этот пакет представляет собой высокоуровневое программное обеспечение, используемое для моделирования двумерных и трехмерных магнитных полей электромеханических преобразователей и позволяет определить момент и скорость вращения подвижной части. Моделирование магнитного поля низкооборотного СГПМ проведено на ПК Pentium Core 2 Duo E8400 с тактовой частотой процессора 3 ГГц, установленным объемом опера-

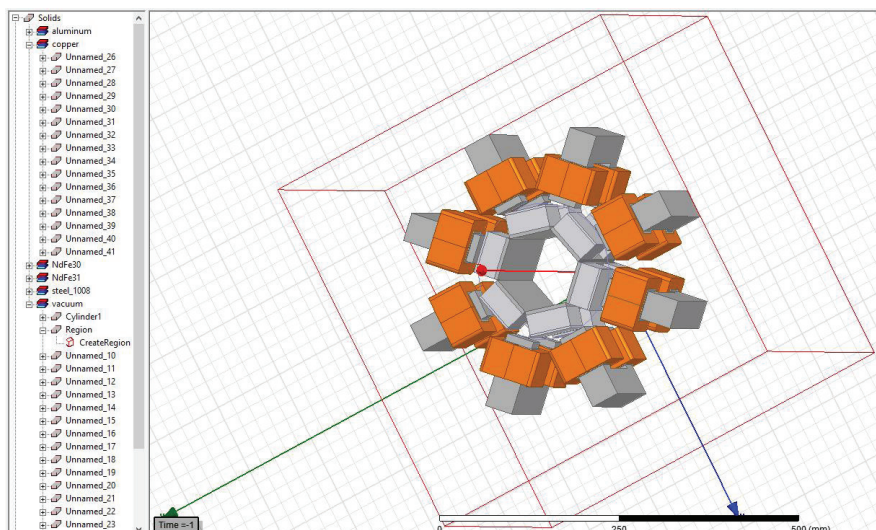


Рис. 3. Модель низкооборотного СГПМ в области моделирования программного обеспечения ANSYS/Maxwell

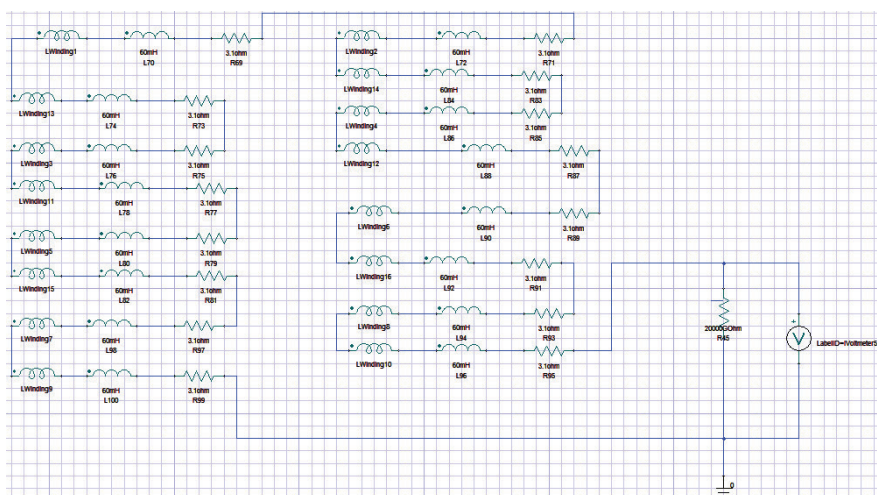


Рис. 4. Схема соединения обмотки якоря низкооборотного СГПМ

тивной памяти 8 Гб, объем занимаемого дискового пространства на HDD программы ANSYS/Maxwell и решаемой задачи 1 Гб и 247 Мб соответственно, видеокарта 4 Гб. Количество конечных элементов, используемых в задаче, не превышает 100 000.

В процессе создания модели в программном обеспечении ANSYS/Maxwell приняты следующие утверждения и допущения:

- электромагнитное поле СГПМ не является стационарным и не обладает симметрией;
- вследствие отсутствия симметрии в расчетной области представлена полная трехмерная твердотельная модель низкооборотного СГПМ;
- катушки электромагнитов с током представлены в виде параллелепипедов со скругленными боковыми ребрами, имеющими вырез для закрепления на П-образном магнитопроводе;
- плотность тока равномерна распределена по поперечному сечению катушек электромагнитов;
- относительная магнитная проницаемость стальных шихтованных П-образных магнитопроводов определяется в соответствии с кривой намагничивания электротехнической стали;
- для задания граничных условий трехмерная модель СГПМ помещена в куб (Region), размер ко-

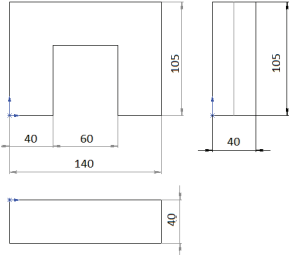
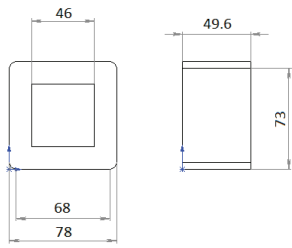
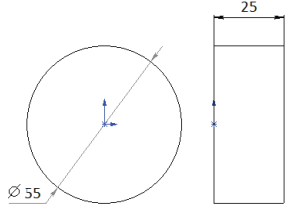
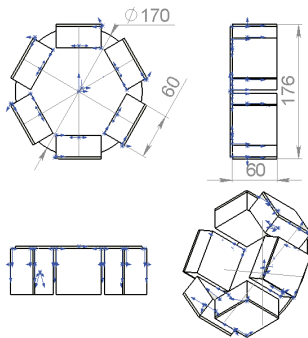
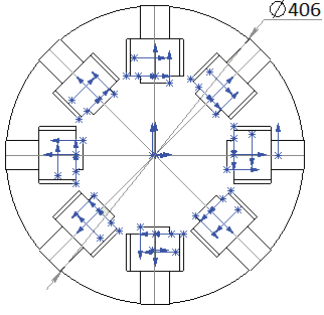
торого по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  превышает размер модели на 15 % (рис. 3);

— на внешней поверхности Region принято граничное условие для векторного магнитного потенциала  $A = 0$ .

После загрузки программы ANSYS/Maxwell на экране дисплея ПК выводятся следующие объекты интерфейса:

- главное меню «Maxwell Main Menu» — здесь собран весь список команд, позволяющих пользователю работать с файлами проекта, осуществлять построение геометрии, определять тип модели, задавать ряд специфических параметров вывода информации о состоянии модели;
- окно менеджера проекта «Project Manager», которое содержит всю информацию о проекте: имя проекта, закон движения подвижной части СГПМ ротора, граничные условия, параметры состояния обмоток, сведения о сетке конечных элементов, на которые разбита область построения, параметры решателя модели, а также представление результата в табличном и графическом виде;
- область построения модели «Maxwell-3DDesign1 – Modeler» — главное окно, содержащее твердотельную трехмерную модель СГПМ.

Элементы конструкции опытного образца низкооборотного СГПМ

№	Элемент магнитной системы	Геометрические параметры, мм	Магнитные свойства материалов
1	Электромагнит		Электротехническая сталь
2	Обмотка якоря		Обмотка выполнена медным проводом марки ПЭТВ, диаметр жилы 1,8 мм, активное сопротивление каждой катушки $R = 1,6 \text{ Ом}$ .
3	Постоянный магнит		Сплав марки Нм30Ди6Р, остаточная индукция
4	Ротор		
5	Статор		

В качестве исходных данных для расчета магнитного поля использовались геометрические размеры магнитной системы исследуемой конструкции СГПМ, приведенные в табл. 1.

Коэффициент заполнения по меди равен 0,4. Скорость вращения ротора в модели принята 400 об/мин. На этапе подготовки модели принято, что обмотка якоря СГПМ состоит из 16 последовательно соединенных катушек, расположенных на сердечниках электромагнитов. При этом мгновенное значение ЭДС обмотки якоря равно сумме мгновенных значений ЭДС, индуцируемых в катушках электромагнитов. Последовательное соединение катушек электромагнитов выполнено в программном модуле ANSYS/Maxwell Circuit Editor (рис. 4).

На основе построенной математической модели низкооборотного СГПМ в программном модуле ANSYS/Maxwell получена трехмерная картина магнитного поля (рис. 5), распределение индукции магнитного поля в воздушном зазоре (рис. 6), волновые диаграммы напряжения и тока в обмотке якоря в режимах холостого хода и короткого замыкания (рис. 7а, б).

Результаты математического моделирования предложенной конструкции низкооборотного СГПМ в программном модуле ANSYS/Maxwell со-

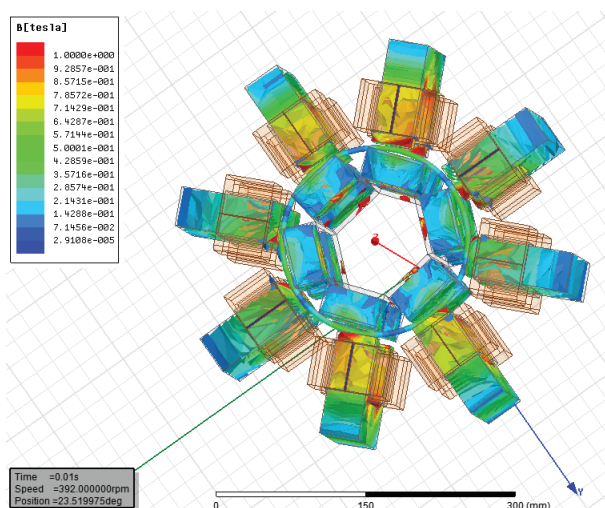


Рис. 5. Цветная карта распределения индукции магнитного поля низкооборотного СГПМ в режиме холостого хода

поставлены с результатами экспериментального исследования его опытного образца на испытательном стенде, электрическая схема которого приведена на рис. 8. На стенде регулирование угловой

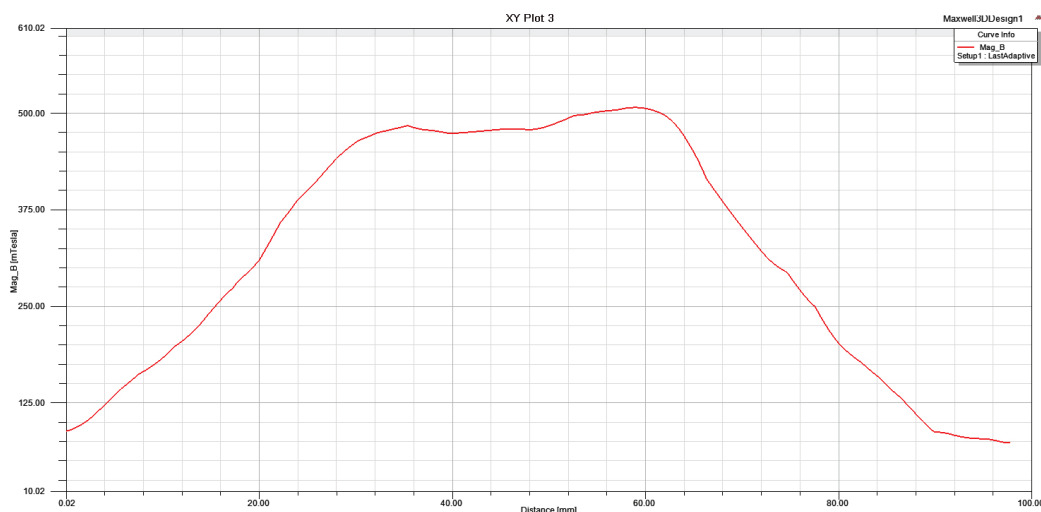
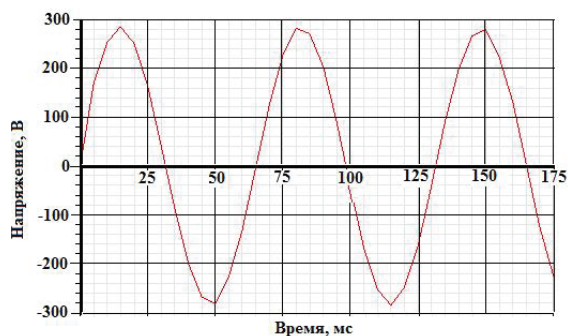
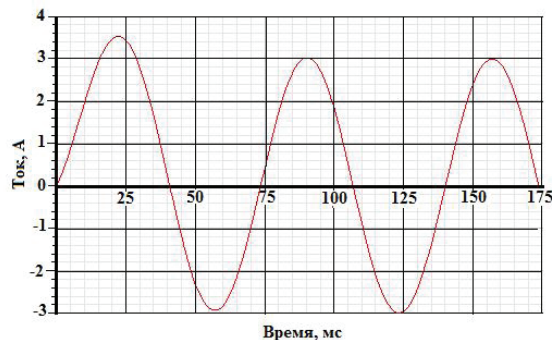


Рис. 6. Распределение магнитной индукции в межполюсном зазоре в пределах дуги, охватывающей полюс постоянного магнита и полюс электромагнита при их расположении друг против друга



а)



б)

Рис. 7. Расчетные временные зависимости напряжения на обмотке якоря в режиме холостого хода (а) и тока в режиме внезапного короткого замыкания (б)

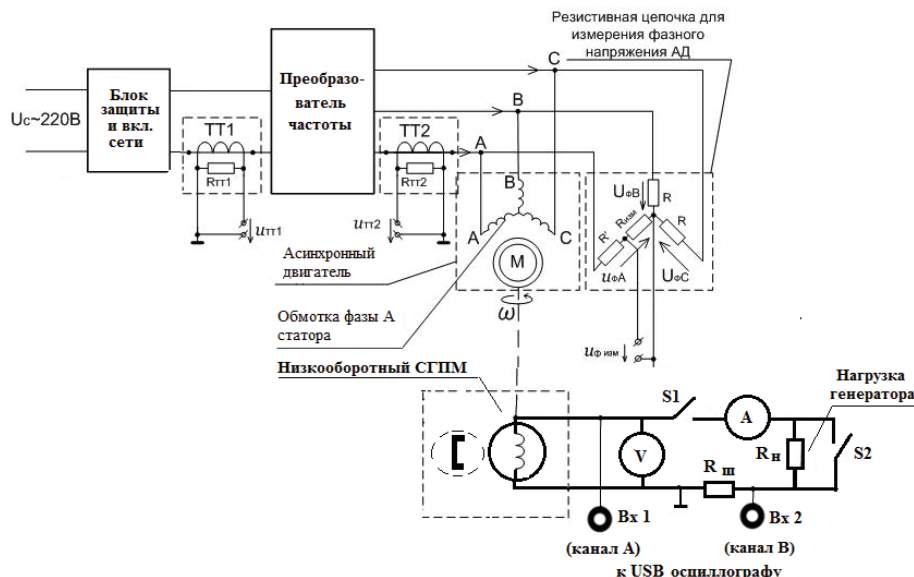


Рис. 8. Электрическая схема испытательного стенда

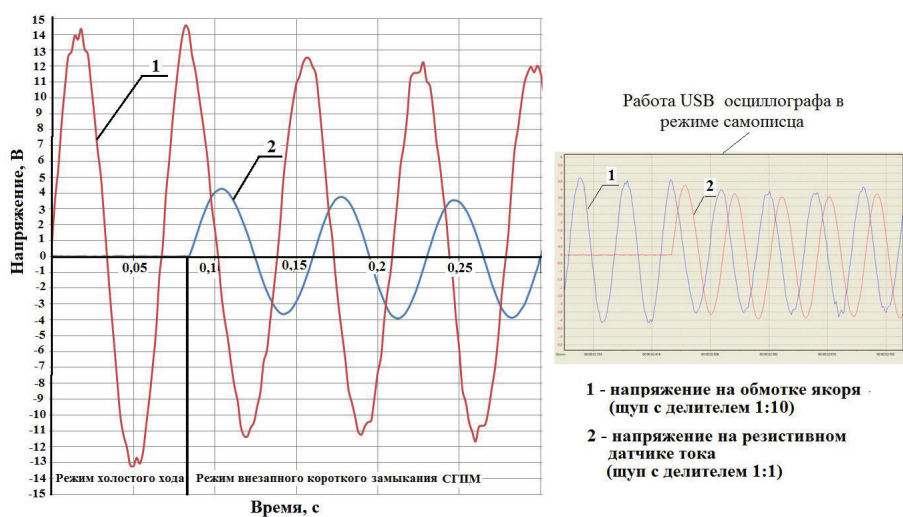


Рис. 9. Осциллограммы напряжений одной половины обмотки якоря и напряжения на резистивном датчике тока в режиме холостого хода и внезапного короткого замыкания СГПМ

скорости вращения вала низкооборотного СГПМ осуществлялось с помощью частотного управления асинхронным двигателем, вал которого связан с валом синхронного генератора втулочной муфтой. Измерение скорости вращения вала производилось цифровым контактным тахометром. Снятие временных диаграмм напряжений на выводах обмотки якоря СГПМ и резистивном датчике тока сопротивлением  $R_{ш} = 1$  Ом выполнено с помощью двухканального USB осциллографа, работающего в режиме самописца и щупом для осциллографа с делителем 1:10.

Экспериментальные временные зависимости напряжения и тока в обмотке якоря СГПМ в режимах холостого хода и короткого замыкания показаны на рис. 9а, б.

#### Выводы.

1. Предложена конструкция низкооборотного СГПМ, которая удовлетворяет критериям в модельном ряду ВЭУ мощностью 0,1 – 100 кВт.

2. Построена математическая модель низкооборотного СГПМ в программном модуле ANSYS/

Maxwell, позволяющая исследовать динамические характеристики синхронного генератора на основе численного расчета трехмерного магнитного поля в режимах холостого хода и внезапного короткого замыкания.

3. Проведены экспериментальные исследования опытного образца СГПМ на испытательном стенде в режиме холостого хода и внезапного короткого замыкания, которые показали хорошую сходимость с расчетными временными зависимостями напряжения и тока в обмотке якоря, полученными на основе математического моделирования в программном модуле ANSYS/Maxwell Circuit Editor.

#### Библиографический список

1. Проектирование электрических машин / Под ред. И. П. Копылова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2016. 767 с. ISBN 978-5-9916-1848-9.
2. Кривцов В. С., Олейников А. М., Яковлев А. И. Неисчерпаемая энергия. В 2-х кн. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы. Харьков: ХАИ, 2003. 400 с. ISBN 966-662-044-8.

3. Кривцов В. С., Олейников А. М., Яковлев А. И. Неисчерпаемая энергия. В 2-х кн. Кн. 2. Ветроэнергетика. Харьков: ХАИ, 2004. 520 с. ISBN 966-662-079-0.
4. Ветроэнергетика. Информационно-аналитический обзор по альтернативной энергетике: моногр. / Под общ. ред. В. А. Дзензерского, Г. Г. Пивняка. Днепропетровск: НГУ, 2014. 156 с. ISBN 978-966-350-524-4.
5. Яковлев А. И., Загучная М. А., Меркушев В. Н. [и др.]. Расчет и проектирование ветроэлектрических установок с горизонтально-осевой ветротурбиной и синхронным генератором на постоянных магнитах. Харьков: ХАИ, 2003. 125 с.
6. Saban D. M., Gonzalez-Lopez D. A., Bailey C. Beyond IEEE Std 115 and API 546: Test Procedures for High-Speed Multimegawatt Permanent Magnet Synchronous Machines // IEEE Transactions on Industry Applications. 2010. Vol. 46, Issue 5. P. 1769–1777. DOI: 10.1109/TIA.2010.2057399.
7. Huynh C., Zheng L., Acharya D. Losses in High Speed Permanent Magnet Machines Used in Microturbine Applications // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2009. Vol. 131, Issue 2. DOI: 10.1115/1.2982151.
8. Kolondzovski Z., Arkkio A., Larjola J. [et al.]. Power Limits of High-Speed Permanent-Magnet Electrical Machines for Compressor Applications // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2011. Vol. 26, Issue 1. P. 73–82. DOI: 10.1109/TEC.2010.2089459.
9. Безруких П. П., Безруких П. П. (мл.), Грибков С. В. Ветроэнергетика: Справ.-метод. изд. / под общ. ред. П. П. Безруких. М.: ИнтехэнергоИздат; Теплоэнергетик, 2014. 304 с. ISBN 978-5-98385-014-9.
10. Исмагилов Ф. Р., Герасин А. А., Хайруллин И. Х. [и др.]. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Машиностроение, 2014. 267 с. ISBN 978-5-94275-755-7.
11. Чучалин А. И., Сафьянников И. А., Россамахин И. Н. Многополюсный генератор для ветроустановок малой мощности // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307, № 5. С. 123–127.
12. Кулагин Р. Н. Анализ конструкций тихоходных генераторов с постоянными магнитами // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. Волгоград, 2011. № 13 (86). С. 79–80. ISBN 978-5-9948-0872-6.
13. Татевосян А. А., Огорелков Б. И., Татевосян А. С. Расчет индуктированной ЭДС в витке при относительном движении постоянного магнита с различной формой поперечного сечения // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 179–183.
14. Пат. 2565775 Российская Федерация, МПК Н 02 К 21/14. Бесколлекторный синхронный генератор с постоянными магнитами / Татевосян А. А., Татевосян А. С. № 2014140005/07; заявл. 02.10.14; опубл. 20.10.15, Бюл. № 29.
15. Ansoft Maxwell 3D. User's Guide // Ansoft Corporation. Pittsburg, 2006. URL: [http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D\\_V11.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf) (дата обращения: 16.10.2018).

**ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрическая техника», декан энергетического факультета.

SPIN-код: 6456-8370

AuthorID (РИНЦ): 163175

AuthorID (SCOPUS): 56503745000

ResearcherID: M-3175-2015

Адрес для переписки: karo1@mail.ru

#### Для цитирования

Татевосян А. А. Выбор оптимальной конструкции, экспериментальное исследование и математическое моделирование магнитного поля низкооборотного синхронного генератора на постоянных магнитах // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 86–93. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-86-93.

Статья поступила в редакцию 30.10.2018 г.

© А. А. Татевосян