

УДК 621.313.17

ГРЕБЕНИКОВ В.В., канд. техн. наук,
Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев,
ШЫМЧАК П.П., канд. техн. наук,
Заходнопоморский технологический университет в Щецине,
г. Щецин, Польша
ПРЫЙМАК М.В., аспирант,
Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев

**ГРЕБЕНИКОВ В.В.****ШЫМЧАК П.П.****ПРЫЙМАК М.В.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ МАЛОЙ ВЕТРО- И ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ

Приведены результаты расчета магнитного поля электрогенератора с постоянными магнитами и зависимости тормозного момента от положения ротора относительно статора. Также приводятся результаты расчета динамических характеристик электро-генератора.

В связи со значительным уменьшением ископаемых энергоносителей во всем мире стали быстрыми темпами развивать энергетику на обновляемых и неисчерпаемых источниках (энергии ветра, солнца, поверхностных вод и др.). Для электроснабжения населения, живущего в сельской местности со слабо развитой централизованной энергосистемой,

для электропитания удаленных от энергосетей объектов небольшой мощности оптимальным являются автономные системы энергоснабжения с применением в качестве генерирующих источников энергии ветроэлектрических установок малой мощности и аккумуляторов-накопителей электроэнергии [1]. При этом достаточно мощности 1÷5 кВт для электроснабжения большинства потребителей (стиральная машина, холодильник, компьютер — в типовом загородном доме; средства связи, системы охраны, безопасности и резервного электропитания — для промышленных объектов).

Для этих целей применяются либо ветроустановки с горизонтальной осью вращения, либо с вертикальной осью вращения ветроротора (типа ротора Дарье). Ветроустановки с вертикальной осью вращения обладают рядом преимуществ: независимость работы от направления ветрового потока, возможность размещения электрогенератора в основании ветроустановки, уменьшение шумности ветроустановки и т. д. При этом, если в

ветроустановке с вертикальной осью вращения применить механизм управления положением лопастями, то можно получить существенно больший КПД преобразования энергии ветра [3]. Частота вращения ветроротора с вертикальной осью вращения составляет $n = 100 \div 150$ об/мин.

Следует также отметить, что в последнее десятилетие начали появляться гидротурбины для работы в потоке с небольшой скоростью воды. В Украине имеется огромное количество рек со скоростью течения от 0,5 до 1,5 м/сек, кинетическая энергия течения в которых практически не используется. Для этих целей также можно использовать гидротурбины с вертикальной осью вращения (типа ротора Дарье). К преимуществам гидротурбины с ротором Дарье можно отнести следующее: простота конструкции; удобное соединение с электрогенератором (генератор может быть размещен на верхнем конце вертикального вала над поверхностью воды); малая гидродинамическая шумность [4]. Частота вращения гидроротора зависит от скорости течения воды и диаметра ротора Дарье и составляет, как правило, около 100 об/мин.

В настоящее время в Украине практически отсутствует серийное производство автономных ветро- и гидроэнергетических установок малой мощности, а также электрогенераторов для этих установок. Целью данной работы является моделирование электрогенератора мощностью $P = 2$ кВт и частотой вращения $n = 150$ об/мин.

Для ветро- и гидроэнергетических установок малой мощности используются синхронные электрогенераторы на основе редкоземельных постоянных магнитов (ПМ) [1, 7, 8]. Стоимость элект-



рогенераторов, которые предлагаются сегодня на рынке, весьма значительна. Поэтому при разработке и проектировании электрогенераторов на основе постоянных магнитов существенное значение имеет конфигурация магнитной системы, которая должна быть оптимизирована по массе ПМ. В данной работе показан подход к разработке тихоходного электрогенератора.

Прежде всего, для уменьшения стоимости электрогенератора можно использовать статор от серийного асинхронного электродвигателя. Предварительные расчеты показали, что для электрогенератора мощностью $P = 2$ кВт и частотой вращения $n = 150$ об/мин может быть использован статор асинхронного 12-ти полюсного электродвигателя типа АИР200L12. На роторе такого генератора должна формироваться 12-ти полюсная магнитная система, ПМ в которой могут размещаться или тангенциально (на поверхности ротора), или радиально [2]. При тангенциальном размещении магнитов, необходимо на поверхности ротора разместить либо двенадцать ПМ чередующейся полярности, либо шесть однополярных ПМ. Как показали предварительные расчеты значение тормозного электромагнитного момента, действующего на ротор при нагрузке, уменьшается не более, чем на 25 % при использовании шести ПМ вместо двенадцати. Ввиду большой стоимости ПМ целесообразно применять конструкции с числом ПМ вдвое меньше числа полюсов генератора. Таким образом, стоимость изготовления электрогенератора может быть снижена за счет использования статора серийного асинхронного двигателя и применения решений, описанных в [5], которые позволяют использовать любую толщину ПМ и их число может быть вдвое меньше числа полюсов электрогенератора.

На Рис. 1 показан сектор такого электрогенератора, статор 1, которого взят от асинхронного электродвигателя АИР200L12, ротор 2 состоит из основания 3, выполненного из конструкционной стали СТ20. В пазах ротора на немагнитных стойках размещены полюсные башмаки 4, форма и размеры которых соответствуют форме и размерам внешней поверхности зубьев ротора, под полюсными башмаками установлены ПМ с одинаковым направлением намагниченности. Внешний диаметр статора равен $D_c = 349$ мм, внутренний диаметр статора $D_i = 250$ мм, число пазов ста-

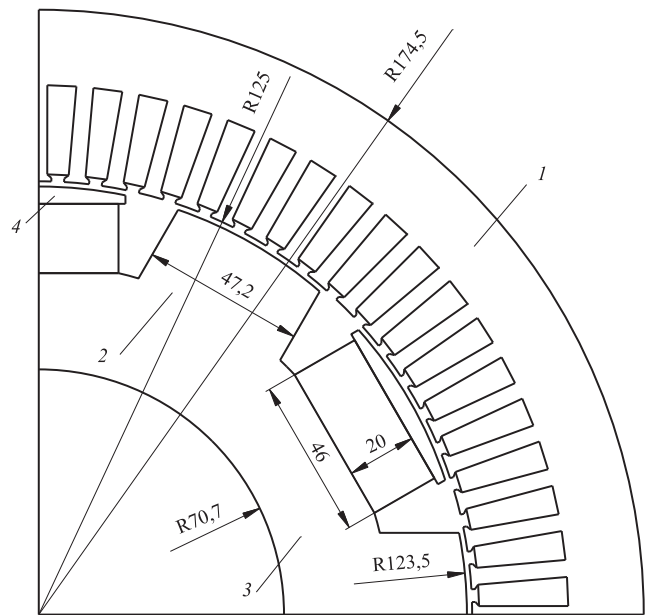


Рис. 1. Основные размеры электрогенератора с постоянными магнитами

тора равно $Z_1 = 72$. Внешний диаметр ротора равен $D_r = 247$ мм, ширина ПМ — $b_{\text{ПМ}} = 46$ мм, для определения рациональной конфигурации толщина ПМ варьировалась в диапазоне $h_{\text{ПМ}} = 5 \div 24$ мм. Аксиальная длина статора и ротора — $L_a = 185$ мм. Величина рабочего зазора между ротором и статором равна $\delta_0 = 1,5$ мм.

На Рис. 2 приведена картина распределения магнитного поля в поперечном сечении исследуемого генератора для двух конфигураций ротора. Слева представлен генератор с шестью магнитами на роторе, а справа — генератор с двенадцатью магнитами на роторе. Моделирование магнитостатики осуществлялось в программном пакете COMSOL 3.5. Во всех расчетах коэрцитивная сила ПМ задавалась равной $H_{CB} = 927600$ кА/м, остаточная индукция $B_r = 1,2$ Тл, магнитная проницаемость ПМ принята равной — $\mu_{\text{ПМ}} = 1,03$; магнитопровод статора — сталь СТ2211 (с учетом нелинейности кривой намагничивания); полюсные башмаки и железо статора — конструкционная сталь СТ20 (с учетом нелинейности). Расчеты магнитостатики выполнялись для момента времени, когда ток в фазе А максимальный и условно положительный, а фазах В и С ток вдвое меньше и условно отрицательный. С учетом коэффициента заполнения паза равного $k_3 = 0,5$ плотность тока в фазе А задавалась равной $J_A = 5$ А/мм², а в фазах В и С соответственно $J_B = J_C = - 2,5$ А/мм². Анализируя картины

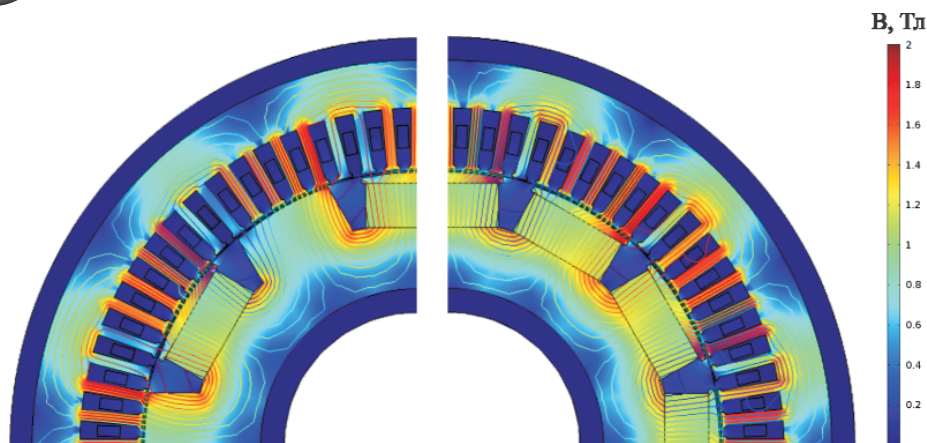


Рис. 2. Картина магнитного поля електрогенератора для заданного моменту часу, слева представлений генератор з 6-ю магнітами, справа – з 12-ю магнітами.

распределения магнитного поля для двух вариантов исполнения ротора, следует отметить, что индукция для обоих случаев конфигурации отличается не значительно.

На Рис. 3 показано сравнение тормозного момента, действующего при нагрузке на ротор, для двух рассматриваемых модификаций электрогенератора. Средний момент, определяемый в пределах среднего диапазона, для электрогенератора с шестью магнитами равен 193 Нм, а с двенадцатью – 242,8 Нм. Т. е. при уменьшении количества ПМ вдвое средний момент уменьшается на 25 %, кроме того, в варианте с шестью ПМ пульсации электромагнитного момента меньше. При весе одного магнита 1,28 кг полный вес шести постоянных магнитов составляет 7,68 кг, а двенадцати – 15,36. Таким образом, приняв за основу конфигурацию электрогенератора с шестью магнитами, можно уменьшить его стоимость.

Стоимость электрогенератора можно также уменьшить за счет выбора оптимальной толщины ПМ. В частности, толщина ПМ должна быть такой, чтобы при заданной конфигурации магнитной системы и массе железа статора и ротора обеспечить максимум мощности генератора. На практике при длине магнита более 150 мм довольно проблематично изготовить ротор с малой толщиной ПМ. Чтобы не разрушались ПМ при сборке ротора и затем при эксплуатации генератора приходится использовать их завышенную толщину. В предлагаемом подходе ПМ размещаются между полюсными башмаками и дном паза ротора [5]. При таком технологическом решении толщина ПМ может быть любой, поскольку ПМ вставляется в зазор между полюсным башмаком и дном паза ротора и закрепляется боковыми немагнитными стойками (на Рис. 1 не показаны).

В данной работе исследовалось влияние толщины магнита на величину тормозного

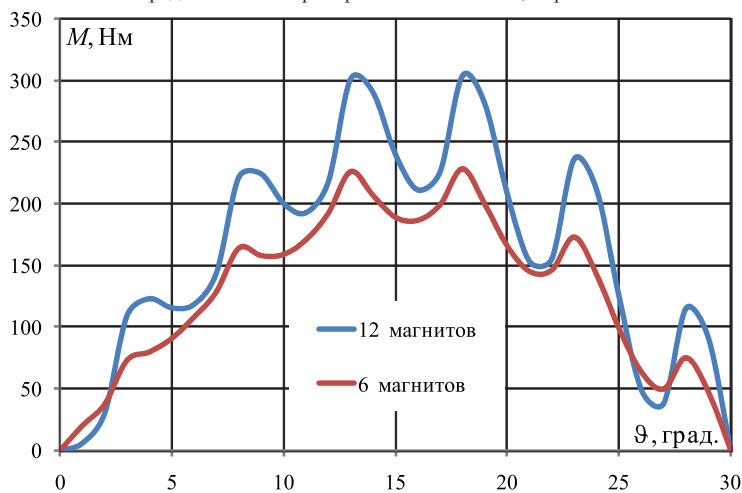


Рис. 3. Сравнение зависимостей тормозного момента генератора от положения ротора для двух конфигураций ротора (6 магнитов и 12 магнитов).

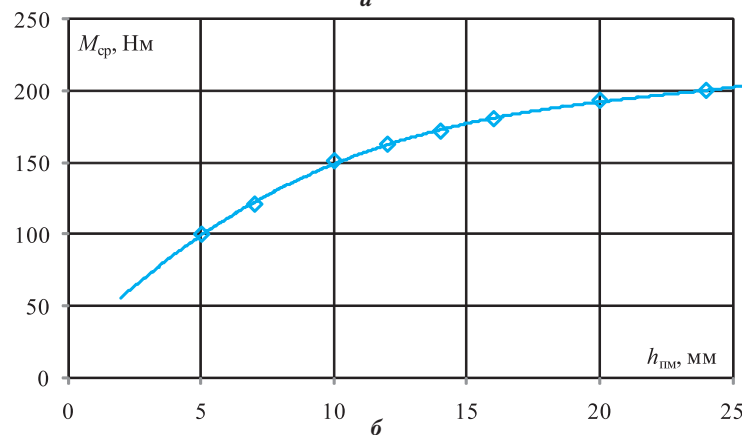
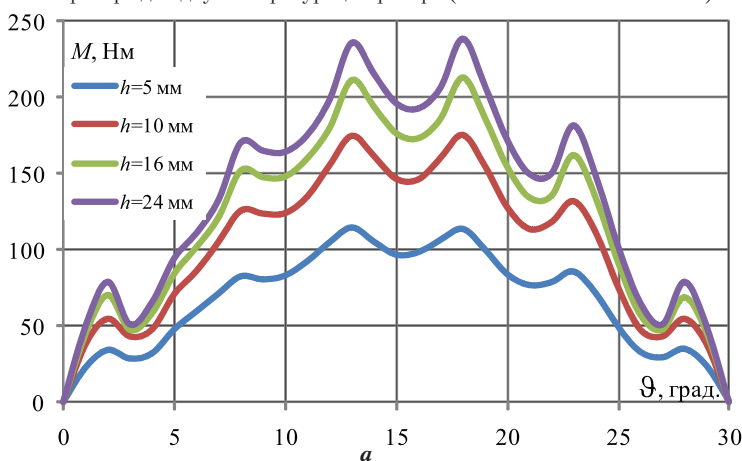


Рис. 4. Зависимости тормозного момента от положения ротора (а) и среднего электромагнитного момента от толщины магнитов на роторе (б).

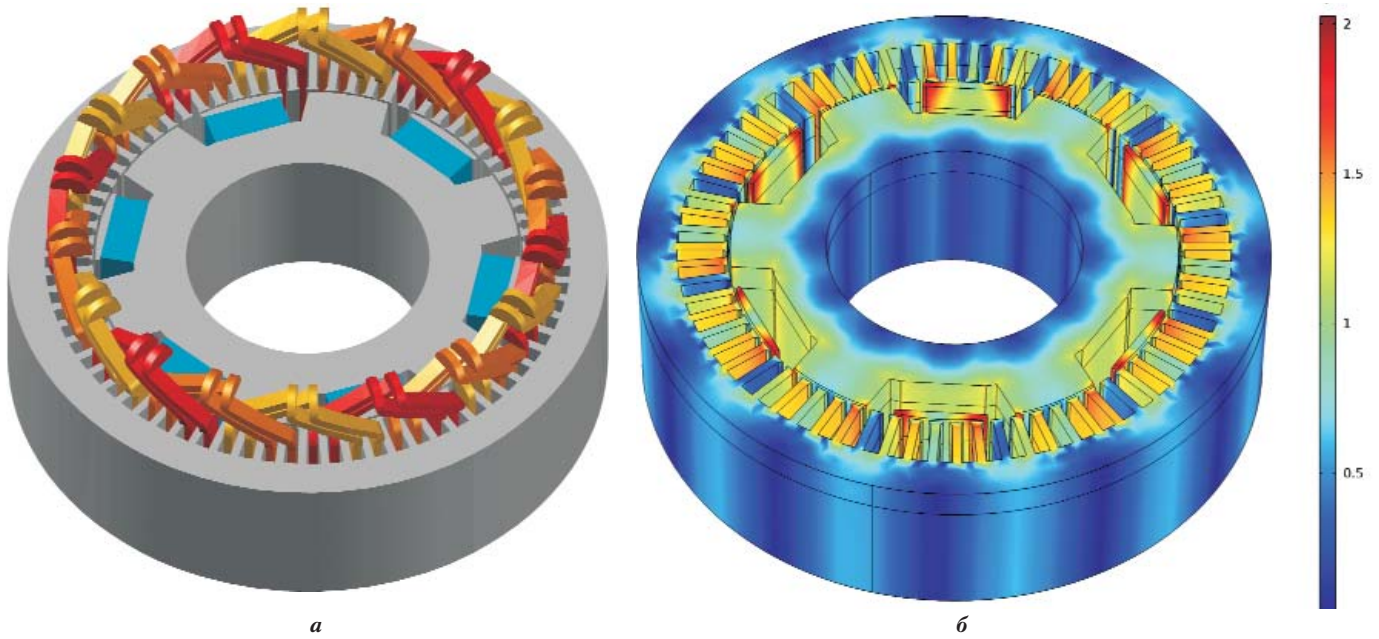


Рис. 5.

электромагнитного момента. На Рис. 4, а приведена зависимость тормозного электромагнитного момента, действующего при нагрузке на ротор, от угла поворота ротора при вариации толщины ПМ в диапазоне $h = 5 \div 24$ мм.

Зависимость, приведенная на Рис. 4, а вычислялась в диапазоне от оси d (поле соответствующих полюсов ротора направлено согласно с полем возбужденных фаз статора) до оси q (поле соответствующих полюсов ротора направлено встречно с полем возбужденных фаз статора). Для 12-ти полюсного генератора этот диапазон равен 30° (геометрических градусов). Сле-

дует отметить, что в кривой электромагнитного момента наблюдается ряд экстремумов. Для уменьшения пульсаций тормозного электромагнитного момента можно выполнять скос плюсов на роторе на величину полюсного деления статора [2].

На Рис. 4, б приведена зависимость среднего

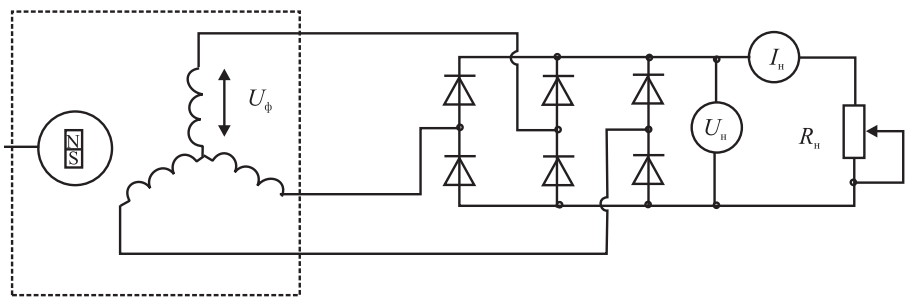


Рис. 6. Схема электрическая принципиальная для расчета переходных процессов элек-трогенератора.

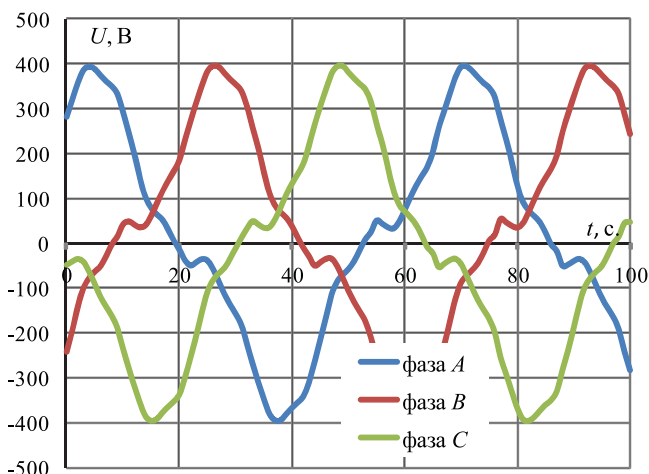


Рис. 7. Расчетная зависимость напряжения в фазах генератора от времени.

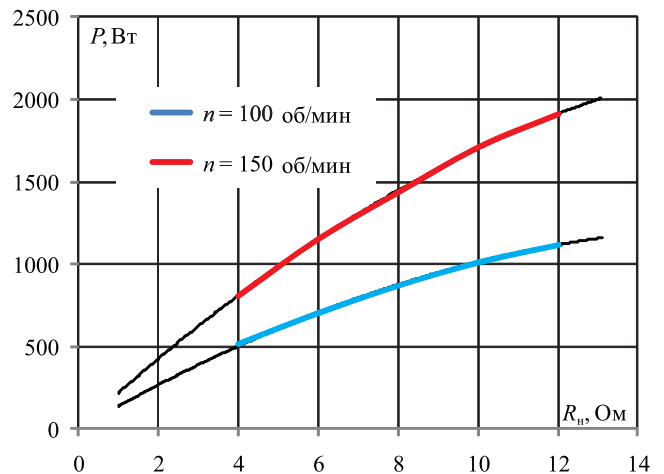


Рис. 8. Зависимость мощности генератора от сопротивления нагрузки.



электромагнитного момента в зависимости от толщины ПМ. Средний электромагнитный момент, действующий при нагрузке на ротор, определялся в пределах среднего диапазона [2]. Результаты расчетов показывают, что при толщине ПМ более $h_{\text{пм}} = 24$ мм нет существенного прироста электромагнитного момента. Поскольку стоимость магнитов существенна, то, исходя из критерия – *цена электрогенератора/величина электромагнитного момента*, оптимальной толщиной ПМ является $h_{\text{пм}} = 20$ мм. Средний электромагнитный момент при данной толщине равен $M_{\text{ср}} = 190$ Нм.

При испытании электрогенератора с ПМ меньшей мощности [2] было обнаружено нагревание подшипниковых щитов уже при частоте вращения ротора более $n = 200$ об/мин. Исследование поля в 3D моделях в программном пакете COMSOL 3.5 показало, что торцевые потоки рассеяния постоянных магнитов ротора замыкаются через элементы конструкции статора, находящихся соосно с ротором и при вращении ротора наводят в них вихревые токи, величина которых зависит от числа оборотов ротора. Вихревые токи вызывают тепловые потери в конструкциях статора, в том числе и в подшипниковых щитах, что приводит к уменьшению энергетических показателей электрогенератора, а нагрев подшипников – к уменьшению ресурса его работы.

Для уменьшения нагрева подшипниковых щитов и улучшения энергетических показателей электрогенератора были применены два ферромагнитных диска. Диски закрепляются соосно с ротором и неподвижно по отношению к нему на расстоянии, большем величины воздушного зазора. Внешний диаметр дисков не меньше диаметра ротора, а внутренний – не больше внутреннего диаметра слоя постоянных магнитов [6].

На Рис. 5, а показана расчетная модель 3D, которая рассечена посередине статора для уменьшения числа треугольных элементов расчетной области. На Рис. 5, б показана картина распределения магнитной индукции в железе статора и ротора (для удобства восприятия картины магнитной индукции ферромагнитные диски, обмотки и ПМ не показаны). Следует отметить, что наблюдается некоторое насыщение зубцов статора, находящихся под полюсами ротора и кончиков полюсных башмаков, однако макси-

мальная индукция в зубцах статора не превышает $B_{\text{max}} = 1,8$ Тл.

Численное исследование 3D модели показало, что часть потока замыкается через диск, не проникая в элементы конструкции и в подшипниковые щиты, т. е. диски служат экраном для магнитного потока. Таким образом, ферромагнитные диски «оттягивают» часть магнитного потока из рабочего зазора, но препятствуют возникновению вихревых токов в подшипниковых щитах электрогенератора.

При проектировании электрогенераторов важен не только расчет магнитостатики, но и расчет переходных процессов. При расчете переходных процессов использовалась схема с 3-х фазным выпрямителем, которая приведена на Рис. 6.

В расчетах сопротивление нагрузки варьировалась в диапазоне $R_{\text{н}} = 4 \div 14$ Ом, а частота вращения ротора – $n = 100 \div 150$ об/мин. Этому диапазону соответствует частота вращения электрогенератора при использовании его в ветроустановке с вертикальной осью вращения. При использовании этого электрогенератора для гидротурбины с вертикальной осью вращения, как отмечалось выше, частота вращения ротора составляет примерно $n = 100$ об/мин.

На Рис. 7 показана расчетная зависимость напряжения в фазах генератора при сопротивлении нагрузки, равном $R_{\text{н}} = 4$ Ом и частоте вращения ротора $n = 100$ об/мин. Следует отметить, что форма напряжения отличается от синусоидальной, это связано с пульсациями торцевого электромагнитного момента.

На Рис. 8 приведены зависимости мощности генератора от активного сопротивления нагрузки для двух значений частоты вращения генератора – $n = 100$ об/мин и $n = 150$ об/мин.

При величине нагрузки равной $R_{\text{н}} = 14$ Ом, что соответствует номинальному току генератора, мощность генератора равна $P = 2$ кВт (при $n = 150$ об/мин). Таким образом, проведено численное исследование магнитной системы генератора и найдена рациональная конструкция, обеспечивающая заданную мощность при заданной частоте вращения.

Выводы.

1. Конфигурация магнитной системы электрогенератора с ПМ существенным образом влия-



ет на его характеристики, поэтому на стадии предварительного проектирования необходимо осуществлять расчет магнитного поля и тормозного электромагнитного момента.

2. Для уменьшения стоимости изготовления электрогенератора предложена специальная конструкция магнитной системы, в которой применен статор серийного производимого асинхронного электродвигателя типа АИР200L12, а ротор при количестве полюсов равном двенадцати имеет шесть тангенциально размещенных ПМ.

3. Проведены численные исследования тормозного электромагнитного момента при вариации толщины ПМ и определена их рациональная толщина, исходя из важного критерия — *цена электрогенератора/величина электромагнитного момента*.

4. Для уменьшения нагрева подшипниковых щитов и улучшения энергетических показателей электрогенератора было проведено исследование магнитного поля в 3D модели и предложено применение ферромагнитных дисков, закрепляемых соосно с ротором на его валу.

5. Проведен расчет переходных процессов электрогенератора под нагрузкой и приведены результаты расчета зависимости напряжения в фазах от времени и мощности электрогенератора от величины нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзензерский В.А., Тарасов С.В., Костоков И.Ю. Ветроустановки малой мощности, — Киев: Наук. думка, 2011. — 590 с.
2. Гребеников В.В. Электрогенераторы с постоянными магнитами для ветроустановок и микро-ГЭС. // Гідроенергетика України. — 2011. — № 1. — С. 43-48.
3. Каян В.П., Довгий С.О., Кочин В.А., Лебедь А.Г. Исследование влияния активного управления прямыми лопастями на рабочие характеристики ветроротора Дарье. // Прикладна гідромеханіка. — 2010. — т. 12. — № 3. — С. 12-23.
4. Каян В. П., Лебедь А.Г. Оптимизация работы модели водной турбины типа ротора Дарье с активным управлением лопастями. // Відновлювальна енергетика. — 2011. — № 4. — С. 46-54.
5. Патент України № 99683/Барабаш В.А., Богаенко М.В., Гребеніков В.В., Попков В. С. Электрична машина з постійними магнітами. // Бюл. — 2012 — № 17.
6. Патент України на корисну модель — 69243 / Барабаш В.А., Богаенко М.В., Гребеніков В.В., Попков В.С., Приймак М. В. Электрична машина з постійними магнітами. // Бюл. — 2012 — № 8.
7. Bernatt J. Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwajymi; BOBRME „KOMEL”; Katowice 2010
8. Szymczak P. Innovative designs of permanent magnet synchronous machines; Elektrizestvo — № 9; — 2009. — S. 37-44.

© Гребеников В.В., Шымчак П.П., Приймак М.В., 2012

