УДК 621.311

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. А. Бубенчиков, Г. Ю. Киселев, Т. В. Бубенчикова, Е. А. Манакова, Н. А. Терещенко,
В. И. Беляев, М. А. Голованов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В данной статье приведён обзор на различные типы современных генераторов для ветроэлектрических установок (ВЭУ), которые являются наиболее эффективными, надежными и имеют относительно невысокую стоимость, что является альтернативой ныне используемым генераторам в сфере ветроэнергетики.**

Ключевые слова: генератор, ветроэнергетическая система, типы, ВЭУ.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-41-52

I. Введение

В настоящее время, в сфере электроэнергетики большую роль играет энергетика, основанная на возобновляемых источниках энергии. Одной из таких отраслей является ветроэнергетика. Ввиду стремительного развития данной отрасли, с точки зрения конструктивного исполнения и анализа работы механизмов, современные ветрогенераторы нуждаются в некоторых усовершенствованиях и нововведениях.

В данной статье приведён обзор на различные типы современных генераторов для ветроэлектрических установок (ВЭУ), которые являются наиболее эффективными, надежными и имеют относительно невысокую стоимость, что является альтернативой ныне используемым генераторам в сфере ветроэнергетики.

В России внедрению и эксплуатации ветроэнергетических установок уделяется меньшее внимание, чем за рубежом. Причинами этого являются всё еще недостаточно высокие цены на электроэнергию в Российской Федерации, а также отсутствие инвестиций, чего нельзя сказать о ряде других стран с похожими геоклиматическими условиями, такими как: Канада, Дания, Германия, США и другие. К примеру, в Германии, за счёт больших инвестиций, по итогам 2012 года общая мощность ветрогенераторов составила 31,3 ГВт [11], а уже к 2018 году данный показатель превысил 56 ГВт [11], что является колоссальными цифрами. В среднем прирост мощности ветроустановок составил 4 ГВт в год.

II. Постановка задачи

В настоящее время одной из проблем широкого распространения возобновляемых источников энергии, а в частности ветровой энергии, является контроль частоты. Контроль частоты является одним из самых важных вопросов в энергосистемах. Отклонение частоты от нормальной (50±0,2 Гц) ведет к: нарушению режима работы электростанций; снижению производительности механизмов на промышленных предприятиях; снижению КПД основных агрегатов электростанций, что ведет к увеличению потерь в сетях, а также все потребители переменного тока работают на частоте 50 Гц [12].

Контроль частоты усложняется широким распространением электроустановок, работающих на возобновляемых источниках энергии, а в частности ветроустановок. Из-за того, что воздействие ветра на лопасти ветрогенератора непостоянно, образуется временная нестабильность и некоторое отклонение частоты энергосистемы. В качестве решения данной проблемы предлагается воспользоваться методом практического добавления виртуального синхронного генератора с цилиндрическим ротором [1].

Данный синхронный генератор играет роль некоторого «хранилища энергии». При дефиците мощности, что часто бывает при выработки энергии с помощью возобновляемых источников энергии, происходит снижение частоты вращения генератора, а следствием этого снижение частоты подаваемой в сеть. В этом случае виртуальный синхронный генератор, выполняет вторичную роль, он является резервом мощности при колебаниях мощности в основном генераторе и поддерживает определенную установленную мощность (рис. 1).

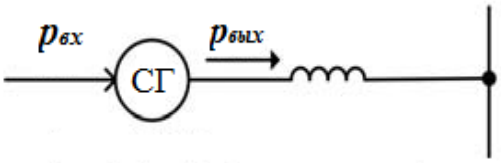

Рис. 1. Модель виртуального синхронного генератора (ВСГ)
с входной и выходной мощностями и длинной линии

В ходе исследования были построены зависимости колебания частоты от времени, с присутствием виртуального синхронного генератора в системе и без (рис. 2).

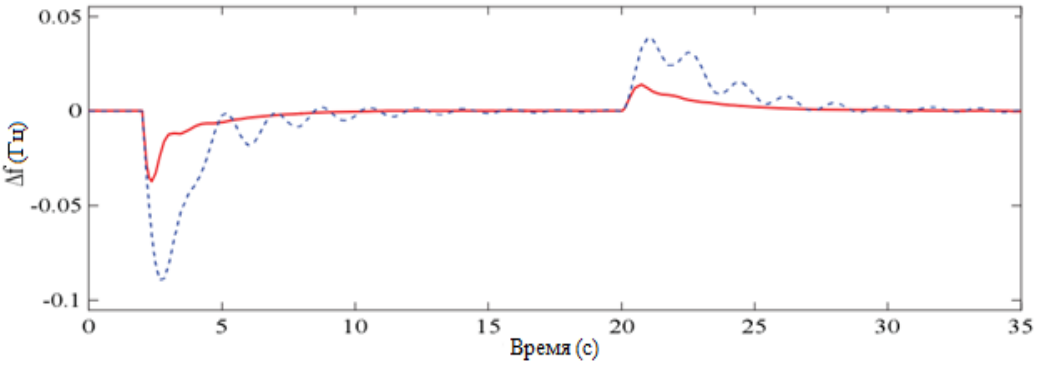

Рис. 2. Зависимость частоты колебаний от времени: красная линия – без синхронного генератора, синяя пунктирная линия – с синхронным генератором

Результаты моделирования показывают высокую эффективность предлагаемого метода. Виртуальный синхронный генератор с ёмкостью хранения энергии, не полностью убирает колебания, но значительно смягчает отклонения частоты при изменении силы ветра [1].

Ещё одним важным показателем электроэнергии является постоянство выходного напряжения. При ныне используемых асинхронных генераторах в ветровых турбинах, за счет непостоянства силы ветра, происходят значительные колебания напряжения, что является проблемой в сфере выработки электроэнергии [2].

Рассмотрим некоторую предлагаемую систему по контролю выходного напряжения (рис. 3). Вся суть предлагаемой системы заключается в том, чтобы вставить инвертор с широтно-импульсной модуляцией (PWM) между самовозбуждающимся асинхронным генератором (SEIG) и трёхфазной нагрузкой переменного тока, тем самым контролируя значение выходного напряжения при изменении нагрузки или скорости ветра. Таким образом, инвертер будет производить контроль выходного среднеквадратичного напряжения и индукции самовозбуждения [2].

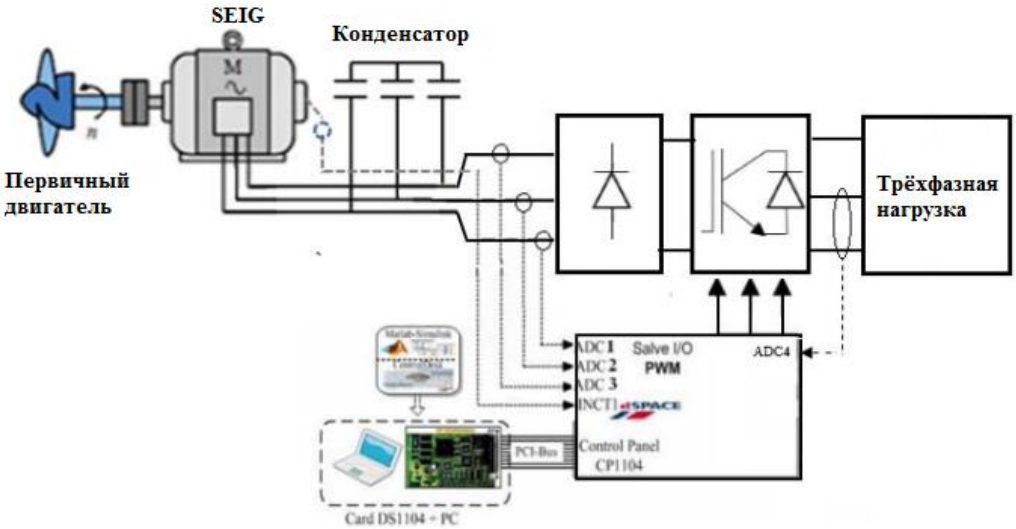

Рис. 3. Схема предлагаемой системы

Эта установка очень перспективна и эффективна в области возобновляемых источников энергии в отдаленных районах, где сила ветра непостоянна из-за сложных географических условий. Это все позволяет снизить затраты на сооружение сложных установок по поддержанию постоянства напряжения, а также поднять эффективность вырабатываемой энергии [2].

Проведя некоторые опыты, при подключении генератора к изолированной нагрузке, было экспериментально подтверждено, что, несмотря на изменение скорости ветра или нагрузки при использовании самовозбуждающегося асинхронного генератора с инвертором, содержащим широтно-импульсную модуляцию, значения напряжения практически постоянны [2].

Рассмотрим ещё одну установку позволяющую поддерживать заданные параметры частоты и напряжения. Автономная система преобразования энергии ветра на основе индукционного генератора двойного питания (DFIG). Данная система состоит из ветровой турбины, генератора и аккумуляторной системы (рис. 4) [3].

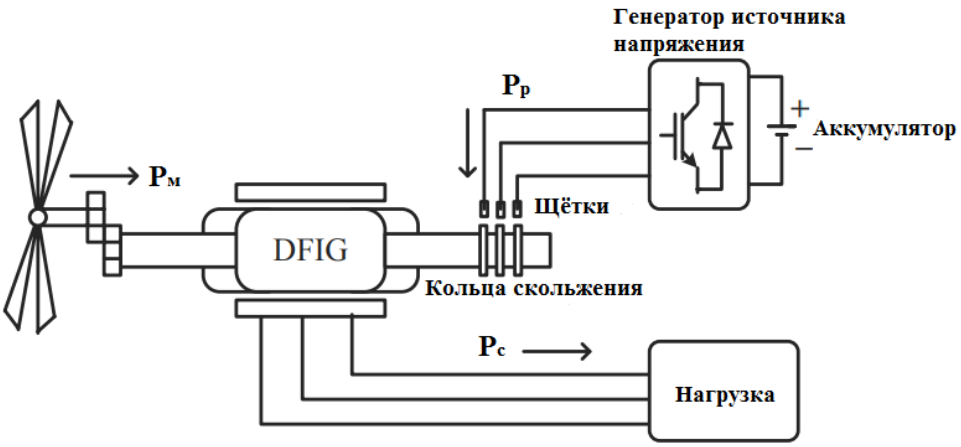

Рис. 4. Схематическая модель системы преобразования энергии ветра

Аккумуляторная система хранения энергии требуется для подачи мощности во время неблагоприятных условий, т.е. при снижении силы ветра либо вовсе при отсутствии. А в нормальном режиме ветряной турбины, через генератор происходит зарядка аккумуляторной системы. Таким образом, происходит поддержание стабильности электроэнергии.

При помощи программных обеспечений MATLAB/Simulink была смоделирована автономная система на основе генератора двойного питания. Для моделирования использовалась машина мощностью 7,5 кВт [3]. Целью моделирования была оценка подходящего положения ротора. Результатами моделирования указывают на то, что система может поддерживать активные и реактивные мощности нагрузки. Условия устойчивого состояния системы получены в течение 0,3 с. (рис. 5) [3].

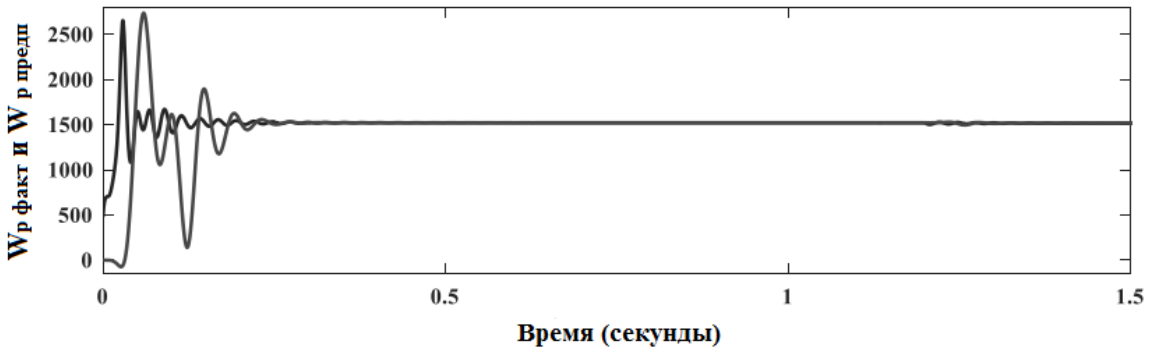

Рис. 5. График фактической и предполагаемой скоростей

Технология управления способна поддерживать постоянное напряжение и частоту статора во время пускового и установившегося состояний системы [3].

Мы рассмотрели некоторые аналитические решения проблем связанные с контролем частоты и напряжения.

III. Теория

Рассмотрим некоторые вариации конструктивных решений для ветрогенераторов, которые позволят повысить эффективность и надежность ветровых установок, а также относительно снизить стоимость проектируемых агрегатов.

1) Тенденция снижения стоимости морской ветряной энергии заключается в разработке крупных ветряных турбин. Турбины с мощностями 6–8 МВт уже наблюдались на рынке ветроэнергетики. Для повышения эффективности ветряных турбин предлагается использовать сверхпроводящий генератор постоянного тока [4]. Из-за высокой токопроводящей способности и отсутствия потерь постоянного тока сверхпроводников, может

быть достигнуто превосходное соотношение мощности к весу (объему) сверхпроводящего генератора [4]. На рис. 6 представлен трехмерный вид модели сверхпроводящего генератора.

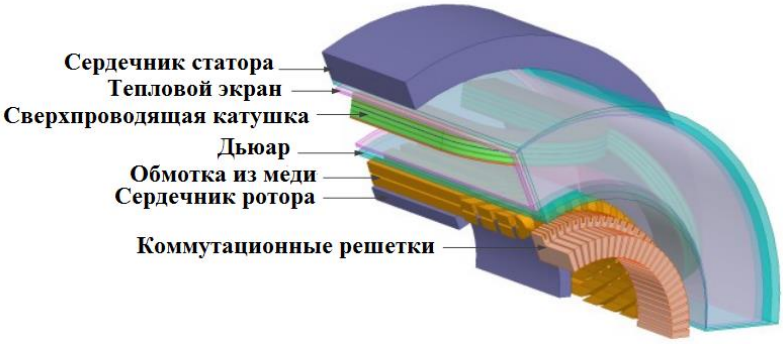

Рис. 6. Трехмерный вид модели сверхпроводящего генератора (без щёток)

В этом генераторе сверхпроводящие катушки используются в основном для генерации основной плотности потока воздушного зазора, а стальные сердечники из кремниевой стали используются статором и ротором (рис. 7). Для изучения возможности предлагаемого генератора и его проектирования измеряют критический ток сверхпроводящего материала и электромагнитные свойства железной стали кремния, из которой состоит сердечник. В качестве предварительного шага к модели было проведено испытание ключевого компонента модели – сверхпроводящей катушки [4].

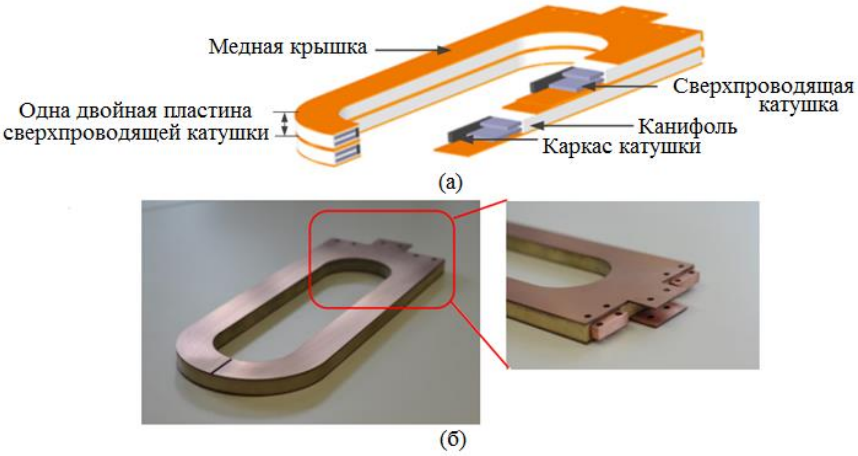

Рис. 7. Структура (а) и Фото одной двойной пластины сверхпроводящей катушки (б)

2) Потенциал энергии ветра (6 Вт/м2) в местах глубокого введения в открытое море значительно выше, чем на земельных участках (1,5 Вт/м2) [5]. Ветряные турбины, значительно удаленные от берега, в прошлом крепились лишь к морскому дну. Данная технология позволяет устанавливать турбины лишь до глубины морского дня 30–50 м, из-за финансовых и технических ограничений. В данной статье рассмотрим некоторые предлагаемые различные способы разработки и установки ветряных электростанций в открытом море. Будущее – это перемещение ветропарков все дальше и дальше от берега, а также для того, чтобы навсегда снизить затраты на развертывание, эксплуатацию и техническое обслуживание. Первая в мире плавучая ветряная электростанция Hywind Scotland Pilot Park, начала производство электроэнергии в октябре 2017 года. Парк имеет пять 6 МВт плавающих ветряных турбин, слабо привязанный к морскому дну в 25 км от побережья [5].

Уже существуют многообещающие технологии конверсии энергии ветра, направленные на решение различных экологических и инженерных задач, и поиск новых инвесторов. Среди них также есть подходы, совместно использующие как ветровые, так и волновые ресурсы, поскольку на Земле имеется много областей с комбинированными (ветряными и волновыми) энергетическими потенциалами. В статье представлен интересный подход, основанный на общем преобразовании энергии для двух энергоресурсов на основе роторно-линейного генератора (РЛГ) [5].

Данное сочетание двух энергоресурсов имеет несколько преимуществ, в основном связанных с экономической точкой зрения. Преимущества синергии между оффшорным преобразованием энергии ветра и волн:

увеличение сбора энергии на единицу массива; предсказуемость из-за более высокой предсказуемости энергии волн; а также использование общей плавающей опоры (швартовки).

На (рис. 8а) показана концепция, состоящая из лонжерона поддерживающего раннее известную плавающую ветряную турбину и осесимметричный тор, который вздымается вдоль лонжерона, чтобы извлечь энергию из волн через гидравлическую систему отбора мощности [5].

На (рис. 8б) представлена концепция, состоящая из полупогруженной плавучей платформы с четырьмя колоннами. Центральная главная колонна, которая содержит ветряную турбину (ВТ), подключается к трем боковым колоннам через понтоны, имеющие закрылки вращающегося типа, навешанные на них. Энергия волн собирается с помощью жестких структурных рычагов и линейного механизма отбора мощности [5].

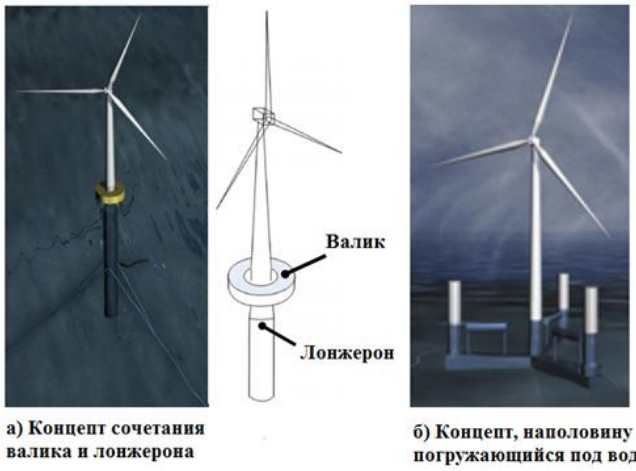

Рис. 8. Два концепта гибридных ветро-волновых преобразователей энергии (ГВВПЭ)

На (рис. 9) представлена ещё одна концепция гибридного энергетического преобразователя, основанного на энергии ветра и энергии волн (ГВВПЭ).

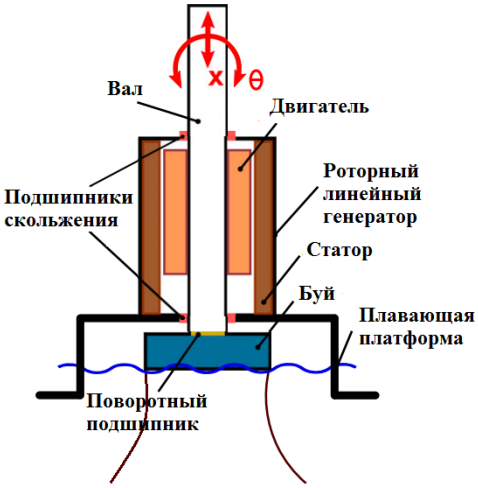

Рис. 9. Предлагаемый гибридный ветро-волновой преобразователь энергии (ГВВПЭ) с вращательно-поступательным генератором (РЛГ)

Основная идея ГВВПЭ заключается в использовании одного роторно-линейного генератора (РЛГ) для сбора энергии ветра и волн. При размещении на плавучей платформе, требуется более легкая и упрощённая опорная конструкция. В нижней части вертикально-осевой ветровой турбины (ВОВТ) расположен статор РЛГ. Вал ВОВТ вращается на буе, поднимается и опускается на волнах, эти два движения и способствуют электродвижущей силе.

За счёт объединения в одной установки двух систем преобразования энергии значительно увеличивается эффективность установки.

Рассмотрим некоторые наиболее эффективные варианты исполнения роторно-линейных машин (РЛМ).

На (рис. 10) представлен вариант генератора интегрированного типа. Он состоит из одного пакета статора, имеющего два набора обмоток. Осевая обмотка (1) связанна с вращательным движением, а обмотка кольцевого типа (2) связанна с линейным движением. Обе обмотки расположены в стальном сердечнике статора (5) и корпусе (3). Внутри машины находится длинный цилиндрический ротор (4) – это сплошной цилиндр, покрытый двойным слоем железа и меди или ротор с поперечной перекладиной [5].

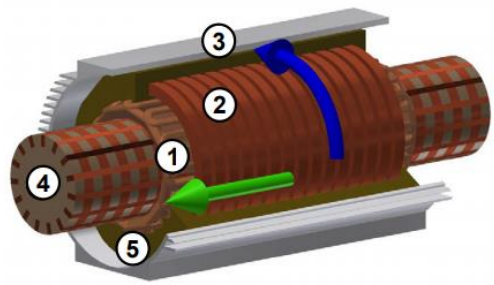

Рис. 10. Индукционная двухобмоточная роторно-линейная машина: 1) Осевая обмотка; 2) Обмотка кольцевого типа; 3) Корпус; 4) Длинный цилиндрический двигатель; 5) Стальной железный сердечник

Данная установка имеет высокую эффективность, за счет интегрированного типа генератора. Недостатком данной концепции генератора является то, что требуется внешняя реактивная мощность.

На (рис. 11) представлена роторно-линейная машина с постоянными магнитами и с чередующимися полюсами. Данные конструкции очень похожи со статорами бесщеточных двигателей постоянного тока. Трубчатый двигатель представляет собой полый цилиндр с ферромагнитным сердечником, по поверхности которого закреплены постоянные магниты, которые намагничены на радиальное направление. Чередования полюсов постоянных магнитов с выступами ферромагнитного сердечника (рис. 11) [5].

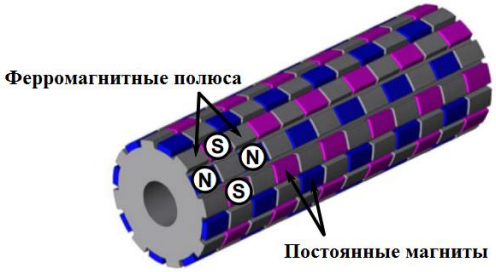

Рис. 11. Ротор роторно-линейной машины с постоянными магнитами с чередующимися полюсами

Еще один концепт роторно-линейного генератора – генератор с переменным сопротивлением (рис. 12). Машины с переменным сопротивлением имеют несколько преимуществ в основном за счет их простой конструкции (пассивный ротор) [5].

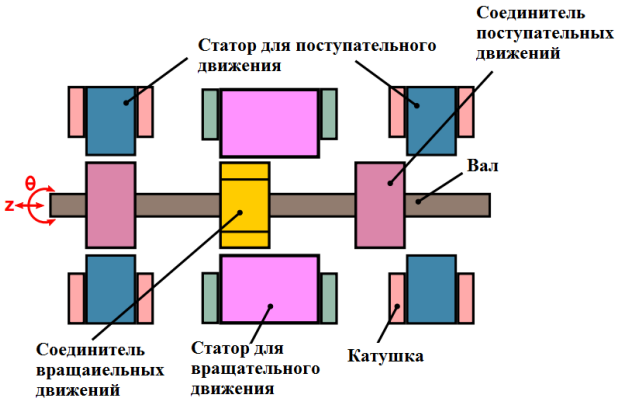

Рис. 12. Серия типа роторно-линейных машин с переменным магнитным сопротивлением

Статор таких машин состоит из трёх частей, вокруг которых выступают столбики и концентрированные витки. Две внешние части статора предназначены для линейного движения, а внутренняя часть для вращательного. Аналогичным образом имеются три железных сердечника размещенные на валу: два сплошных цилиндра для линейного движения и один для вращательного движения с выступающими столбиками. Вал производит возвратно поступательные движения, сопоставляя каждый сердечник с обмотками статора, за счёт чего изменяется магнитное поле.

Исходя из простоты конструкции, высокой эффективности машины и низкой стоимости, данный генератор является самым подходящим для рассматриваемого вопроса ПС РЛМ (рис. 13).

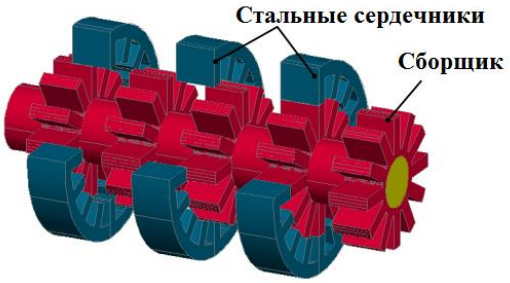

Рис. 13. Железные сердечники модульной роторно-линейной машины с переменным магнитным сопротивлением (ПС РЛМ)

3) Малые ветроэнергетические установки могут служить основными источниками электроэнергии для различных жилых или коммерческих потребностей. В то время как большие ветровые турбины уже достигают своих пределов в рамках существующих технологий по эффективности, небольшие преобразователи энергии ветра все еще находятся в интенсивном изучении и развитии. Большая часть этих исследований сосредоточена на электрических генераторах, поиске лучших технологий и повышении их эффективности и других характеристик. Рассмотрим некоторые конфигурации модульных генераторов переменного магнитного сопротивления, которые имеют большую эффективность по сравнению с обычными генераторами [6].

• Модульный генератор переменного магнитного сопротивления с радиальным потоком. В данных концептах генераторов, статор, ротор или оба могут быть построены по модульному принципу. Сегментация статора производится при помощи С- или Е-образных ламинированных модулей из электротехнической стали.

В данной модели статор генератора состоит из восьми U-образных модулей (сегментов), которые при соединении друг с другом образуют статор генератора (рис. 14). Каждый модуль состоит их железного сердечника, на который помещается медная катушка. Модули друг от друга отделяются специальной немагнитной прокладкой [6]. Модули статора расположены по окружности в радиальном направлении относительно ротора, что создает переменный, радиальный магнитный поток. Также у данной конструкции имеются ключевые преимущества: легкая и дешёвая сборка; высокая отказоустойчивость; значительно снижается количество затрачиваемого железа на сердечник, а также меди, применяемой в качестве обмоток, в результате чего уменьшаются производственные затраты и потери; быстрая замена поврежденного модуля. Модули ротора размещены непосредственно на немагнитный стальной вал и полностью отделены как физически, так и магнитно друг от друга. Из-за чего создается мощный концентрированный магнитный поток, имеющий более короткие пути прохождения в роторе. Это все создает высокий крутящий момент и эффективность данной конструкции [6].

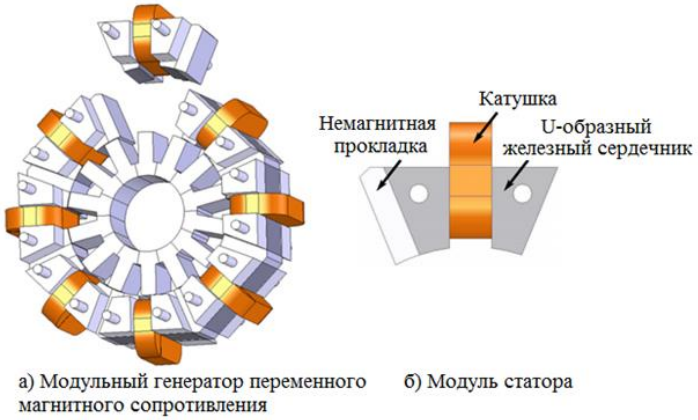

Рис. 14. Модульный генератор переменного магнитного сопротивления с радиальным потоком

• Модульный генератор переменного магнитного сопротивления с аксиальным потоком (рис. 15). Данная конструкция имеет тот же принцип работы, что и классический генератор переменного сопротивления с радиальным потоком, с той лишь разницей, что их магнитный поток ориентирован в параллельном (аксиальном) направлении с валом [6].

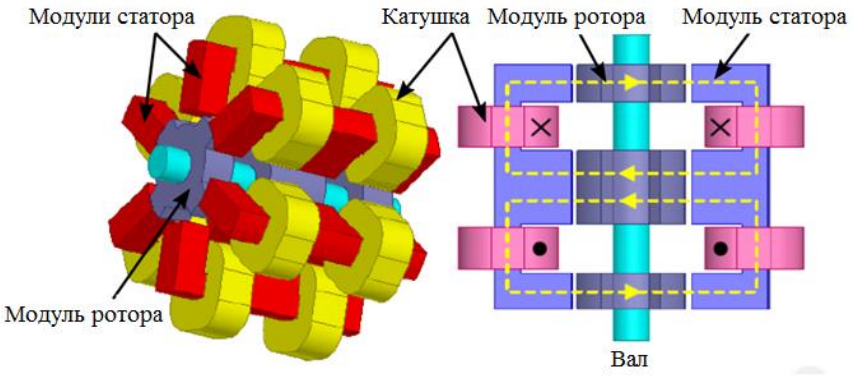

Рис. 15. Модульный генератор переменного магнитного сопротивления с аксиальным потоком

Ротор генератора состоит из Е-образных модулей, насаженных на вал. Статор генератора имеет катушки, намотанные по две штуки параллельно друг другу на каждый модуль статора. Причем катушки намотаны в разных направлениях. Такая вариация статора создает аксиальный, переменный магнитный поток. Эта конструкция обеспечивает малую массу и инерцию, впоследствии чего сокращаются затраты на материалы [6].

• Модульный двойной генератор с постоянными магнитами (рис. 16). Данная конфигурация генератора очень похожа на модульный генератор переменного магнитного сопротивления с радиальным потоком, только вместо немагнитных прокладок, модули статора отделяются друг от друга постоянными магнитами [6].

Данная машина имеет значительные потери в пассивном железном сердечнике. Уменьшить эти потери без существенного снижения выходного крутящего момента, было осуществлено путем сегментации также и его ротора [6].

Данный генератор демонстрирует высокий крутящий момент и большую мощность по сравнению с другими магнито-коммутационными генераторами и генераторами с постоянными магнитами, а также уменьшается несбалансированная радиальная магнитная сила [6].

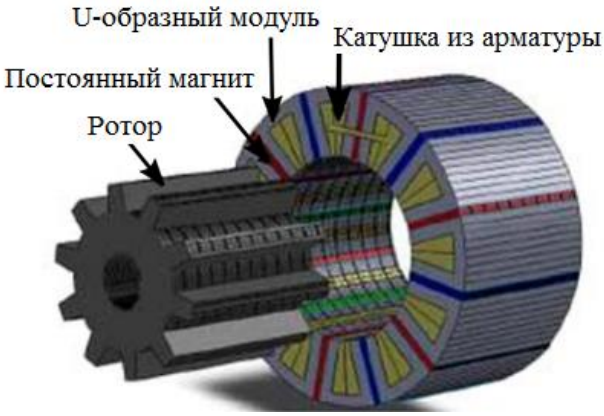

Рис. 16. Машина с постоянными магнитами переменного потока

• Генератор с поперечным потоком (рис. 17). Данные генераторы являются одними из самых новых разработок электрических машин. Их отличительной чертой является поперечное направление путей потока и гомополярная магнитодвижущая сила, создаваемая катушкой кольцевого типа. В катушке ток течет параллельно направлению вращения вала.

Основное преимущество генератора с поперечным магнитным потоком обусловлено его особой конструкцией в том, что число полюсов может быть увеличено (снижение синхронной скорости) без понижения магнитодвижущей силы и мощности. За счёт низких синхронных скоростей, которые могут быть близки к фактической скорости ветра, данные агрегаты отличные кандидаты на генераторы, с прямым приводом используемые в ветряных турбинах.

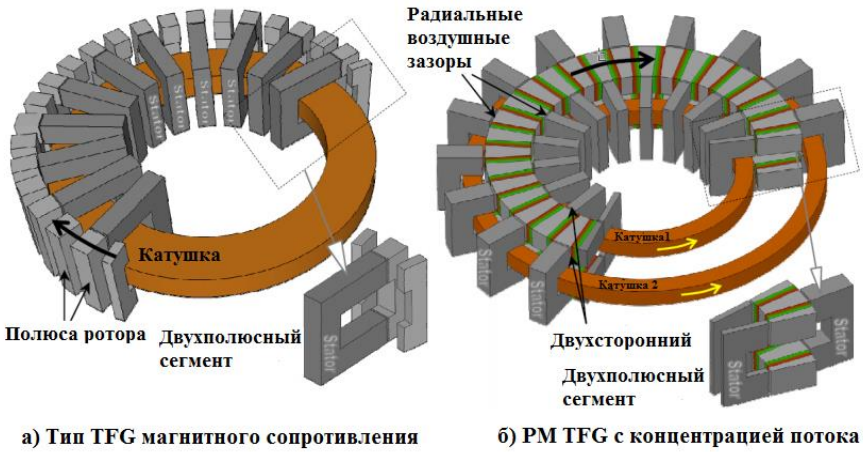

Рис. 17. Два модульных варианта генератора с поперечным потоком

4) Рассмотрим магнито-коммутационную машину с постоянными магнитами (МКПМ) (рис.18). Данные синхронные машины имеют постоянные магниты, закрепленные в корпусе статора. Магниты противоположно намагничены в окружном направлении, таким образом, поток двух соседних магнитов концентрируется в направлении воздушной прослойки. Ротор машины не имеет обмоток и магнитов, но имеет прорези (пазы). Данные пазы по структуре такие же, как у роторов машин с переменным сопротивлением. Это делает более мощный магнитный поток в воздушном зазоре [7].

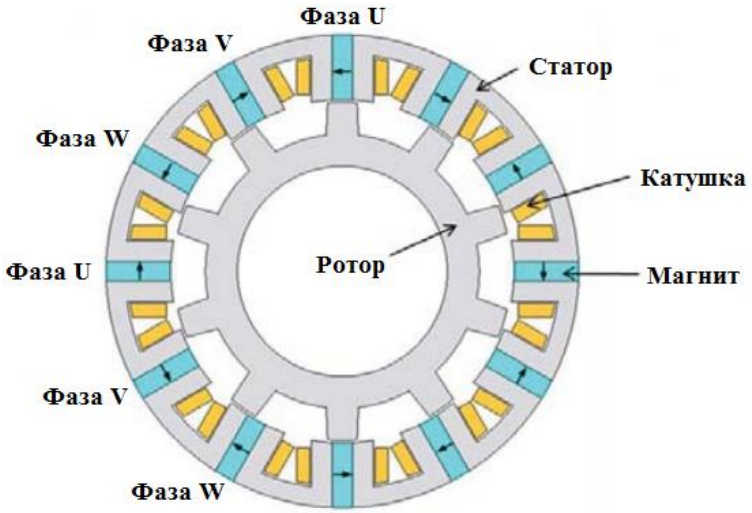

Рис. 18. Разрез разрабатываемой модели магнито-коммутационной машины с постоянными магнитами (МКПМ)

За счёт большего количества полюсов, данная машина хорошо подходит для мало-скоростных приводов с высоким моментом. Также эти машины имеют хорошую охлаждающую способность магнитов, так как в отличие от традиционных машин, где магниты расположены на роторе, в данном варианте магниты располагаются на статоре [7].

Опытным путём сравнения данной МКПМ машины с обычной синхронной машиной с постоянными магнитами (СМПМ) было выявлено, что МКПМ обладает меньшим коэффициентом мощности (0,69) по сравнению с СМПМ (0,96). Это вызвано индукцией, которая в 3 раза больше у первой машины. С другой стороны, МКПМ имеет на 1,3 % большую эффективность из-за более высокой плотности потока в воздушном зазоре [7].

5) Вот ещё одна конструкция электрически возбужденного явнополюсного генератора для использования в небольших ветровых турбинах в диапазоне малой мощности, до 2 кВт (рис. 19). Концепция основана на использовании непосредственно управляемого, электрически возбужденного синхронного генератора, который позволяет использовать относительно низкие скорости, например, ветровые и водяные турбины или электродвигатели с двигателем без трансмиссии. Рабочая точка максимальной эффективности может быть отрегулирована за счет переменного возбуждения в технически наиболее выгодном рабочем диапазоне системы [8].

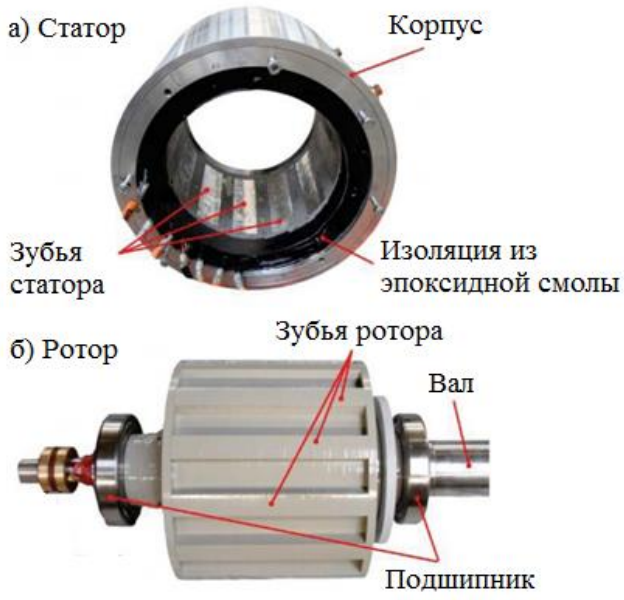

Рис. 19. Конструкция электрической машины
а) Статор; б) Ротор прототипа 45 кВт магнито-коммутационной машины
с постоянными магнитами (МКПМ)

Основное внимание уделяется использованию в небольших ветровых турбинах, потенциал которых на внутренних местах и местах со слабым ветром.

Потенциальные результаты не только применимы к малым ветровым турбинам, но также могут применяться в других областях, где преобразование энергии происходит через низкоскоростную электрическую машину [8].

6) Рассмотрим ещё один уникальный генератор мощностью 20 МВт, с использованием сверхпроводящего материала – диборида магния (MgB2) (рис. 20). Диборид магния используется в качестве материала для обмоток статора и ротора. Ленты из MgB2, работающие при температуре 10 K, используются для обмоток ротора, чтобы улучшить коэффициент уплотнения. Кабель Резерфорда, выполненный из 91-нитевидных проводов MgB2, работающих при температуре 20 K, используется для обмоток статора, чтобы ограничить потери переменного тока. Для статора и ротора рассматриваются два отдельных криостата для повышения надежности системы. Криостат статора статичен, а криостат ротора вращается. Между криостатами помещен медный электромагнитный экран для предотвращения высокочастотных гармоник идущих от обмоток статора. Кроме того, чтобы уменьшить вес машины и упростить криогенную систему, применяется беззубчатая магнитная цепь. По мнению авторов данной вариации генератора, криогенная и электромагнитная системы сильно связаны, и благодаря их сочетанию можно добиться значительного снижения расчётной стоимости энергии [9].

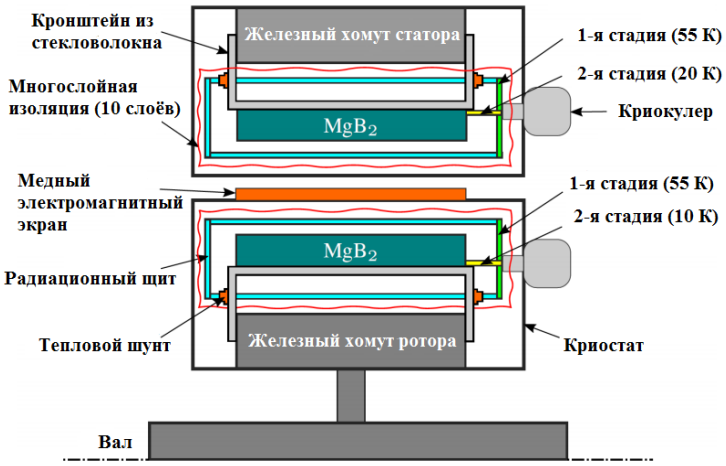

Рис. 20. Криогенная конструкция

Результаты показали, что рассмотренная технология является легкой, позволяющей снизить стоимость гондолы, башни и фундамента, а следовательно, и нормативную расчётную стоимость энергии по сравнению с обычным генератором. Но потери переменного тока велики, и они требуют на данном этапе исследования нецелесообразного количества криокулеров [9].

7) Среднескоростной синхронный генератор магнитного сопротивления. Рассмотрим данный генератор мощностью 2 МВт, как эффективное, надежное и недорогое решение для современных ветровых турбин, так как такие машины не требуют магнитов или медной обмотки в роторе [10]. Незначительная скорость вращения генератора позволяет использовать одноступенчатую коробку передач вместо многоступенчатой коробки передач, что повышает надежность силового агрегата ветровой турбины. Устранение постоянных магнитов и медной обмотки снижает инвестиционные затраты, в то время как повышенная эффективность и улучшенная надежность приводят к снижению эксплуатационных расходов и, следовательно, затрат энергии (рис. 21).

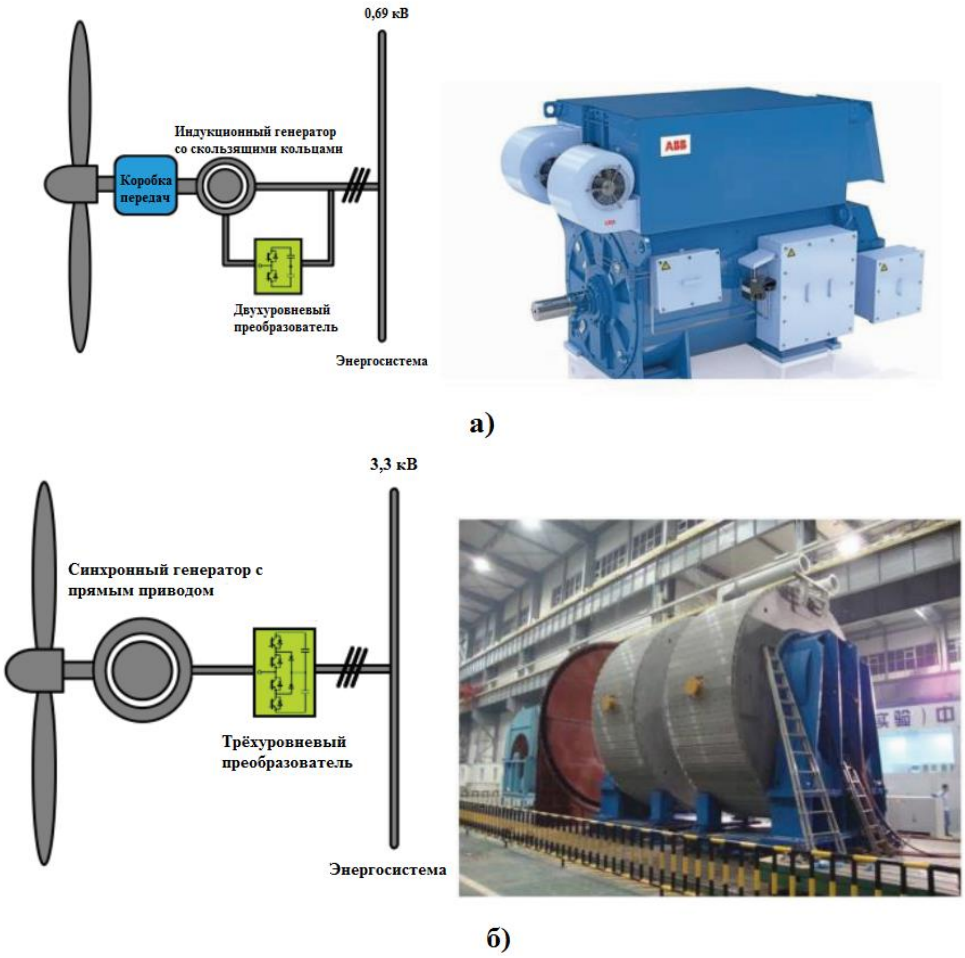

Рис. 21. Современные концепции ветряных турбин с переменной скоростью: а) Индукционный генератор двойного питания с преобразователем частичного масштаба; б) Синхронный генератор с прямым приводом с полномасштабным преобразователем

V. Выводы и заключение

В данной статье были рассмотрены различные современные концепты ветровых турбин, которые позволяют снизить затраты на эксплуатацию, имеют высокую эффективность, а также сравнительно низкую стоимость.

Ветряные турбины с устройствами контроля частоты и напряжения очень даже перспективны, с точки зрения установки на территории России, так как большие территории имеют нестабильность в плане энергии ветра. Агрегаты, рассмотренные выше, могли бы решить данную проблему, так как внедрение турбин с синхронным генератором, играющего роль «хранилища энергии», приводит к улучшению показателей АЧХ. Таким образом, развитие данного ответвления отрасли является перспективным для Российской Федерации.

Что касается ветряных электростанций в открытом море, то можно с уверенностью сказать, что при эксплуатации данных установок будут возникать сложности разного характера. Например, погодные условия, мусор, плавающий в водоёме, могут часто наносить повреждения ВЭУ и возможно даже выводить их из строя.

Если данная установка находится на большом расстоянии от берега, то ремонтной бригаде будет тяжело из раза в раз добираться до нее. Другая проблема – это фауна водоёма, в котором находятся данные ВЭУ. Нельзя с уверенностью говорить о том, что какая-нибудь крупная рыба не захочет атаковать установку. Однако большие потенциалы водных массивов заставляют все-таки задуматься о развитии данных установок, следует подумать о некоторой защите установок и тогда эти генераторы займут лидирующую позицию среди ветрогенераторов.

Ну, а что касается самих концептов генераторов, все они, рассмотренные в данной статье, являются альтернативой ныне используемым генераторам, за счёт сравнительно низкой стоимости, меньших массогабаритных параметров, меньших затрат на производство, а также высокой энергоэффективности. Однако многие из них являются лишь концептами либо единичными экземплярами, это все связано с малым финансированием в область ветроэнергетики.

Подводя итоги можно сказать что, уменьшение веса, габаритов, введение новых универсальных материалов для изготовления конструктивных частей ветроэнергетических установок, совершенствование анализа работы агрегатов и механизмов контроля – всё это говорит о том, что со временем рынок возобновляемых источников энергии будет занимать одно из лидирующих позиций в мире. К сожалению, ископаемые Земли ограничены, данный факт, бесспорно, заставляет человека искать пути решения проблемы энергоресурсов для жизни. Россия – страна богатая полезными ископаемыми, поэтому у нас пока что только рассматривают возможность обширного внедрения ВЭУ по всей территории, несмотря на имеющийся мощнейший ветроэнергетический потенциал.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента № МК-5446.2018.8
Научный руководитель Бубенчиков Антон Анатольевич.

Список литературы

1. Nouri Navid, Masoud Barakati S. Implementing Virtual Synchronous Generator to Load-Frequency Control with Penetration of Wind Turbine Considering Limitation of Storage System Capacity // Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on, 2018. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472508.

2. Abbou Ahmed, Elakhrif Rachid, Mousmi Ali. Vrms control of self-excited induction generators feeding a three-phase AC load used in wind turbine // 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC), 2018.

3. Bhardwaj Prerak, Vijayakumar K. Modelling, operation and speed estimation of standalone wind driven doubly fed induction generator // 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), 2018.

4. Bonfiglio Andrea, Invernizzi Marco, Labella Alessandro, Procopio Renato. Design of a Superconducting DC Demonstrator for Wind Generators // IEEE Transactions on Power Systems (Early Access), 2018.

5. Szabó Loránd. On the use of rotary-linear generators in floating hybrid wind and wave energy conversion systems // 2018 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), 2018.

6. Loránd Szabó. Novel variable reluctance generators used in small wind turbines: The modular approach // 2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC), 2018.

7. Marcel Lehr, Daniel Dietz, Andreas Binder. Electromagnetic design of a permanent magnet Flux-Switching-Machine as a direct-driven 3 MW wind power generator // 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2018.

8. Fabian Lorenz, Ralf Werner, Matthias Föse. Claw pole generator with adapted efficiency curve for small scale wind turbines // 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2018.

9. Trung-Kien Hoang, Loïc Quéval, Christophe Berriaud, Lionel Vido. Design of a 20-MW Fully Superconducting Wind Turbine Generator to Minimize the Levelized Cost of Energy // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, June 2018. Vol. 28, Is. 4. DOI: 10.1109/TASC.2018.2810309.

10. Alnajjar M., Gerling D. Medium-Speed Synchronous Reluctance Generator as Efficient, Reliabile and Low-Cost Solution for Power Generation in Modern Wind Turbines // 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2018.

11. URL: http://24news.com.ua (дата обращения: 14.12.2018).

12. ГОСТ Р 55890-2013 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования. Введ. 2014-09-01. М. : Стандартинформ, 2014. 20 с.