

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МАЛОЙ, СРЕДНЕЙ И БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

**А.А. Котов, Н.И. Неустроев**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Рассмотрена актуальность применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в современном мировом энергетическом хозяйстве, приведены сравнительные статистические данные о доле различных источников энергии в генерации электричества. Особое внимание уделено вопросам использования энергии ветра в качестве источника для генерации электрической энергии, а именно представлена статистика по объему и динамике роста установленных мощностей ветроэнергетических установок (ВЭУ) в мире, а также статистика по объему и динамике роста выработанной электроэнергии при помощи ВЭУ в мире. Проанализированы факторы, которые способствовали развитию ветроэнергетической отрасли в странах с наибольшей долей использования ВЭУ в мире. Описаны конструктивные исполнения существующих типов ВЭУ. Сформулирована основная технологическая проблема ветроэнергетики и определен способ решения данной проблемы. Рассмотрены разные типы генераторов для ВЭУ и проанализированы плюсы и минусы использования всех типов электрических машин в качестве генерирующих устройств в ВЭУ. Определен вектор развития ВЭУ в части выбора типа генератора. Показаны отличительные особенности и преимущества применения машины двойного питания для ВЭУ в сравнении с другими типами электрических машин. Приведена информация о существующих генераторах двойного питания в мировой и отечественной промышленности. Представлена принципиально новая подробная конструкция машины двойного питания с установленным на едином валу бесконтактным возбудителем и описаны главные преимущества данного технического решения относительно традиционной конструкции машины двойного питания, которая включает в себя скользящий контакт.

*Ключевые слова:* ВЭУ, машина двойного питания, асинхронизированный синхронный генератор, DFIG, ветроэнергетика.

### Введение

На сегодняшний день вопрос использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) играет все более и более значимую роль в мировом энергетическом сообществе [1, 2], что, прежде всего, обусловлено стараниями ведущих экономик максимально ослабить свою зависимость от углеводородов. За последние 40 лет, по данным International Energy Agency, заметно изменилось соотношение различных источников энергии, используемых для генерации электричества (рис. 1). При этом доля альтернативных источников энергии (энергия солнца, ветра и т. д.) увеличилась в 14 раз, но по сравнению с остальными источниками энергии она все еще достаточно мала.

### Использование энергии ветра

Одним из наиболее доступных источников возобновляемой энергии является энергия ветра. Вслед за гидроэнергетикой именно ветроэнергетика лидирует среди альтернативных источников по установленным мощностям и объему генерируемой энергии.

На конец 2016 года, по данным Global Wind Energy Council [3], объем установленных мощно-

стей ВЭУ в мире составляет 485 749 МВт (рис. 2). Основная их часть приходится на страны Азии (41,8 %), Европы (33,1 %) и Северной Америки (20,05 %). Страны-лидеры в освоении ветроэнергетики – это Китай, США и Германия (табл. 1).

По данным BP Statistical Review of World Energy 2016 (рис. 3), мировой объем выработанной ВЭУ электроэнергии составил 841,2 ТВт·ч (млрд кВт·ч). За год количество произведенной ВЭУ электроэнергии увеличилось на 17,4 %. Тройка стран-лидеров по объему выработанной электроэнергии та же, что и по объему установленных мощностей ВЭУ – это США, Китай, Германия (табл. 2).

Из представленной информации видно, что всего лишь за последние 20 лет мировой объем установленных мощностей ВЭУ вырос почти в 40 раз, а объем вырабатываемой ВЭУ электроэнергии вырос почти в 30 раз.

### Факторы, способствующие развитию ветроэнергетики

С учетом мирового опыта можно выделить два основных фактора, которые способствуют активному развитию ветроэнергетики. Первый – это

политическая и законодательная поддержка. Так, например, в Германии законодательно закреплена концепция глобального энергетического поворота, согласно которой доля электроэнергии, вырабатываемой с помощью источников возобновляемой энергии, к 2025 году должна составлять 40–45 %. В Китае закон «Об электроснабжении», принятый в 1995 году, фиксирует государственную поддержку развития ветроэнергетической отрасли. Впоследствии принято еще несколько законов, оказывающих значительную поддержку энергетике на ВИЭ. Так, согласно последнему из них, принятому в 2005 году, зарегистрированным поставщикам «зеленой» энергии операторы электросетей обязаны оплачивать ее стоимость по высокому тарифу, установленному правительством.

Второй фактор – это, несомненно, развитие технологий и накопленный опыт. В странах-лидерах с начала коммерческого использования ветроустановок прошло уже около 30 лет. За это время на практике были определены основные направления и способы развития ветроэнергетики, что позволило использовать при производстве ВЭУ более дешевые и эффективные материалы и увеличить единичную мощность ветроэнергетических систем (ВЭС). Кроме того, сказывается эффект масштаба, ведущий к сокращению издержек не только на производстве ВЭУ, но и на выработке ими электроэнергии, что в результате повышает конкурентоспособность ветроустановок по сравнению с другими технологиями производства электроэнергии.



Рис. 1. Доля источников энергии в генерации электричества: а) 1973 год, б) 2014 год

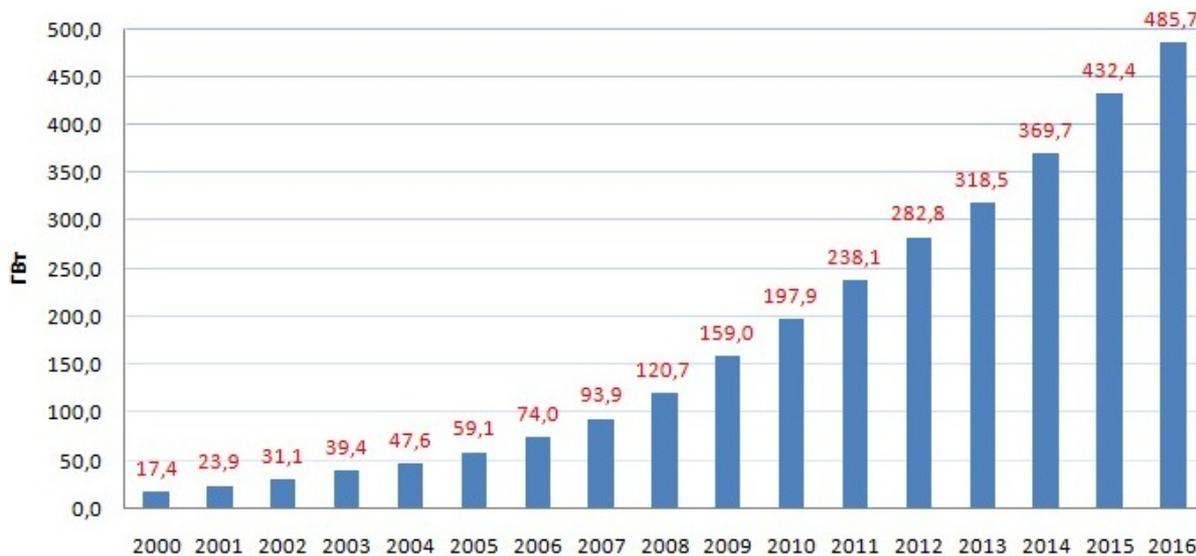


Рис. 2. Динамика объема установленных мощностей ВЭУ в мире

Статистика по объему установленных мощностей среди стран-лидеров (на конец 2016 года)

Таблица 1

Страна	Объем установленной мощности ВЭУ, МВт	Доля в общемировом объеме, %
Китай	168 690	34,7
США	82 184	16,9
Германия	50 018	10,3

## Альтернативные источники энергии

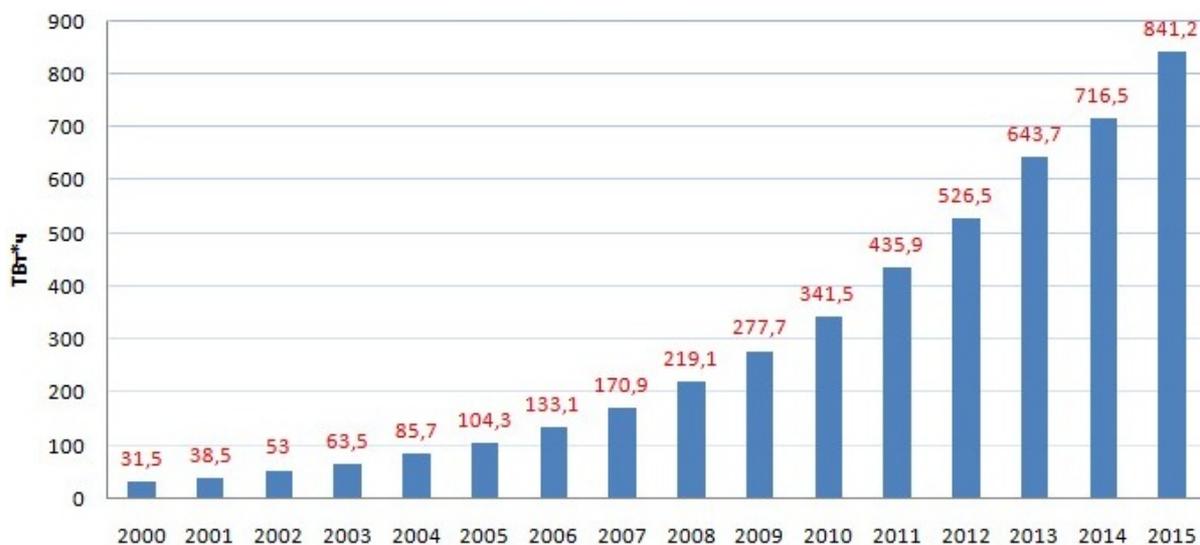


Рис. 3. Динамика мирового объема выработанной ВЭУ электроэнергии

Статистика по объему выработанной электроэнергии среди стран-лидеров (на конец 2016 года)

Таблица 2

Страна	Объем выработанной ВЭУ электроэнергии, ТВт·ч	Доля в общемировом объеме, %
США	192,9	22,9
Китай	185,1	22
Германия	88	10,5

### Конструктивные исполнения ВЭУ

На первый взгляд ветроустановка сочетает в себе два основных конструктивных элемента: турбину, состоящую из лопастей, и генератор. Однако, взглянув более пристально, можно обнаружить, что архитектура ВЭУ весьма разнообразна. К примеру, установки могут различаться следующими конструктивными особенностями:

– направление оси вращения: вертикальное или горизонтальное [4, 5];

– скорость вращения ротора: постоянная или переменная;

– с системой ориентации по ветру или без;

– быстроходная система или тихоходная;

– с прямым приводом или с редуктором (мультипликатором).

В настоящее время отчетливо видно, что мировой парк эксплуатируемых ветроустановок в основном состоит из горизонтально-осевых механизмов (рис. 4). Одно из объяснений популярности

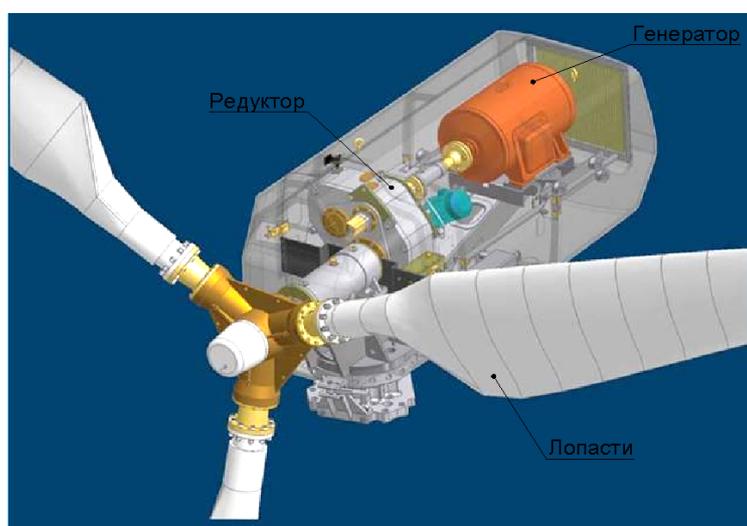


Рис. 4. Принципиальная модель ВЭУ с горизонтальной осью вращения

данного типа ВЭУ – более высокий, чем у вертикально-осевых установок, коэффициент использования ветра. Однако ВЭУ с горизонтальной осью вращения имеют и ряд недостатков. Главный из них – чувствительность к направлению ветра, в результате чего в механизме данного типа приходится применять систему ориентации по ветру и вращающееся контактное устройство (ВКУ) для передачи генерируемого напряжения с подвижной части установки в сеть. Эти особенности приводят к значительному усложнению конструкции ВЭУ, как следствие, к уменьшению надежности, а также к усложнению техобслуживания [6].

Установки с вертикальной осью вращения лишены данного недостатка. Они способны работать при любых направлениях ветра, что, соответственно, исключает необходимость в системе ориентации по ветру. Однако для данного конструктивного решения требуются вертикальные генераторы, их исполнение осложнено использованием упорных подшипников (подпятников), что соответственно приводит к появлению дополнительных ограничений на массогабаритные показатели вертикальных генераторов. Кроме того, считается, что такие установки сильнее подвержены усталостным разрушениям из-за более часто возникающих в них автоколебательных процессов [4]. Именно поэтому ВЭУ с вертикальной осью вращения малоприменимы для ветрогенераторов большой мощности.

### Основная проблема ветроэнергетики

Основная проблема, с которой сталкивается ветроэнергетика, – это получение электроэнергии требуемого качества. Дело в том, что для ветра характерно постоянное изменение скорости и направления, и это напрямую сказывается на параметрах генерируемой энергии – амплитуде и частоте [7, 8]. В то же время требования ГОСТ 32144–2013 устанавливают жесткие нормы качества электрической энергии. Как следствие ветрогенераторы должны быть способны поддерживать строго установленные параметры генерируемой энергии при любом воздействии ветра. Эта проблема решается с помощью системы стабилизации выходной энергии, создаваемой специально для каждого типа генерирующего устройства. Соответственно, наиболее важный вопрос при создании ВЭУ – это выбор типа генератора.

### Типы генераторов

Традиционно можно выделить несколько основных типов генераторов, применяющихся в ветроустановках: генераторы постоянного тока (ГПТ), асинхронные генераторы (АГ), синхронные генераторы (СГ), асинхронизированные синхронные генераторы (АСГ).

1. Структурная схема ВЭУ на основе генератора постоянного тока приведена на рис. 5.

Указанная установка состоит из турбины, ГПТ, инвертора для преобразования постоянного тока в переменный, контроллера для управления преобразованием постоянного тока в переменный нужной частоты и амплитуды, трансформатора, который может и отсутствовать в составе механизма. Очевидно, что ВЭУ на основе машины постоянного тока требует регулярного технического обслуживания и является весьма дорогостоящей из-за наличия коллектора [9, 10] с щеточным аппаратом и коммутатора (инвертор + контроллер). Данная архитектура ВЭУ не завоевала особой популярности в мире, и на сегодняшний день ей находится применение только в качестве ветрогенераторов малой мощности.

2. В середине прошлого века в Дании впервые были применены ВЭУ с постоянной скоростью вращения (в действительности же частота вращения изменяется, но в небольшом диапазоне). В этих системах используются асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором, которые непосредственно соединены с сетью. Структурная схема ВЭУ на основе АГ изображена на рис. 6.

Недостатки данной системы заключаются в том, что АГ для функционирования необходимо потреблять реактивную мощность [11, 12]. В случае работы напрямую с сетью генератор этого типа будет потреблять реактивную мощность из самой сети, что негативно скажется на таком важном параметре, как коэффициент мощности сети ( $\cos\varphi$ ), падение которого ниже определенного уровня недопустимо. Для компенсации реактивной мощности обычно устанавливают конденсаторные батареи [4], но они довольно дорогостоящи и ненадежны. Еще один существенный недостаток – это то, что данный генератор может работать только при определенных ветрах, которые обеспечивают превышение скорости ротора относительно синхронной скорости вращения магнитного поля машины. Также применяются АГ с фазным ротором. Данный тип АГ позволяет вводить в цепь ротора сопротивление, что дает возможность изменять величину скольжения, и, соответственно, работать в более широких диапазонах частоты вращения. Несмотря на указанные недостатки, в большинстве ВЭУ применяются именно АГ.

3. С самого начала развития ветроэнергетики синхронная 3-фазная машина рассматривалась как один из основных типов генераторов. Ее исполнение возможно как с электромагнитным возбуждением, так и с постоянными магнитами, которые позволяют добывать хороших массогабаритных характеристик [9, 13, 14]. Основная проблема данного типа электрических машин заключается в том, что для генерирования переменного тока определенных параметров (частота и амплитуда напряжения) необходимо поддерживать постоянную скорость вращения ротора. В случае с электромагнитным возбуждением есть возможность поддер-

## Альтернативные источники энергии

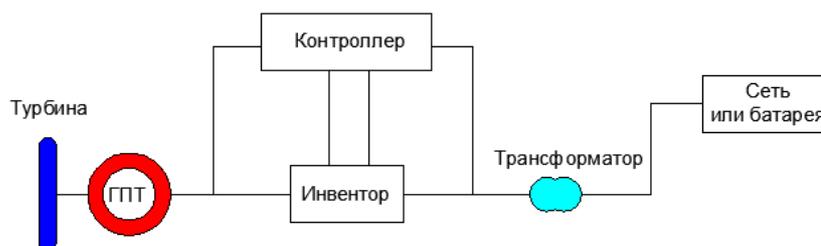


Рис. 5. Структурная схема ветроустановки на основе ГПТ

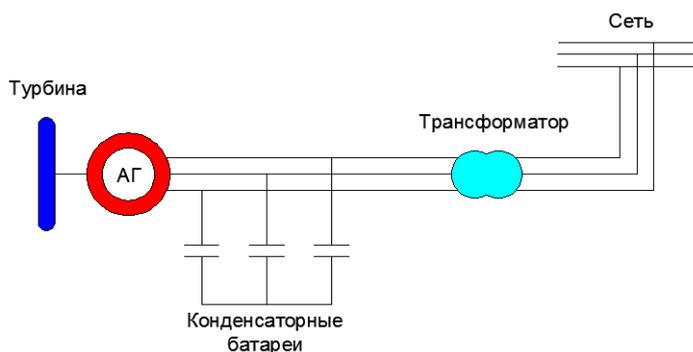


Рис. 6. Структурная схема ветроустановки на основе АГ



Рис. 7. Структурная схема ветроустановки на основе СГ

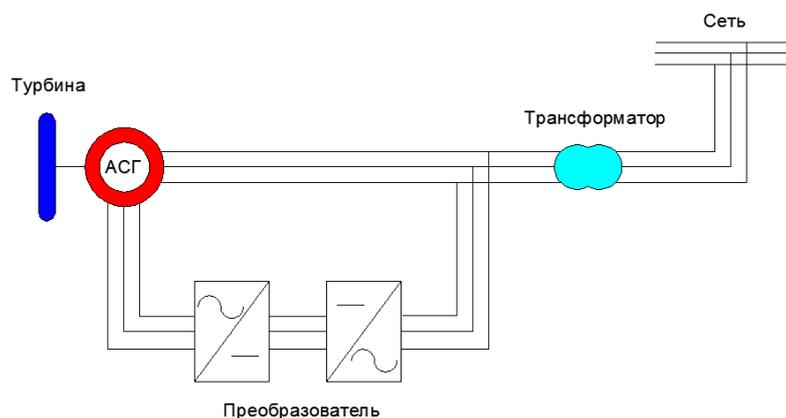


Рис. 8. Структурная схема ветроустановки на основе АСГ

живать в определенном интервале амплитуду генерируемого напряжения за счет изменения магнитного поля возбуждения. Однако добиться поддержания определенной частоты напряжения при изменении скорости вращения невозможно без применения дополнительных устройств. Структурная схема ветрогенераторов на основе синхронной машины приведена на рис. 7.

Как видно из схемы, в состав ВЭУ, помимо турбины и самого генератора, входит электронный преобразователь, который сначала выпрямляет генерируемое напряжение, а потом инвертирует в переменное напряжение со строго заданными параметрами. Данный тип генераторов в настоящее время довольно широко используется в ветроустановках различной мощности. Однако есть опреде-

ленные трудности при создании ВЭУ большой мощности – это ограниченные возможности силовой электроники, применяемой в преобразователях.

4. В последнее десятилетие все большую популярность в системах ветрогенерации завоевывают ВЭУ на основе машины двойного питания (DFIG), называемой еще асинхронизированным синхронным генератором [15]. Конструктивно это тот же самый асинхронный генератор с фазным ротором, но способ его соединения с сетью несколько иной. Обмотку статора подключают к сети напрямую, а обмотку ротора обычно подключают к сети через преобразователь. Структурная схема показана на рис. 8.

Данный тип генератора может функционировать в трех режимах:

1) скорость вращения ниже, чем синхронная скорость: электрическая мощность с необходимой частотой подается из сети в ротор, что соответственно создает поток энергии, идущий из обмотки статора в сеть;

2) скорость вращения равна синхронной: на обмотку ротора подается постоянное напряжение, и он работает в режиме синхронного генератора;

3) скорость вращения выше, чем синхронная: этот режим аналогичен первому варианту, но при нем направление вращения поля ротора противоположное.

Основные особенности данного типа генератора – это способность функционировать в широ-

ком диапазоне частоты вращения ротора ( $\pm 30\%$ ) и возможность управлять потоками реактивной мощности по цепи возбуждения, через которую проходит меньшая мощность, что соответственно сказывается на габаритах и стоимости электронного преобразователя [16]. Стоит отметить, что эти особенности делают машину двойного питания наиболее используемой и эффективной для ВЭС. И, пожалуй, поэтому в большинстве европейских стран в настоящее время делают ставку именно на генераторы двойного питания, которые к 2015 году уже имели долю порядка 85% от установленной мощности ветрогенераторов. Существенный недостаток заключается в наличии щеточного контакта, который для надежной работы машины требует внимательного техобслуживания.

К настоящему моменту в мире есть две компании-гиганта, которые освоили и наладили серийное производство генераторов двойного питания для ветроустановок большой мощности, – это европейские фирмы ABB и Siemens.

Компания ABB сейчас располагает линейкой генераторов двойного питания мощностью от 2,2 МВт до 3,6 МВт с воздушным и жидкостным охлаждением. КПД этих механизмов достигает 97,5% (рис. 9).

Компания Siemens располагает большей линейкой генераторов двойного питания, чем ABB (рис. 10). На данное время они предлагают генера-



Рис. 9. Генератор двойного питания (ABB)



а)



б)

Рис. 10. Генераторы двойного питания (Siemens) мощностью 2,5 МВт (а), мощностью 5,3 МВт (б)

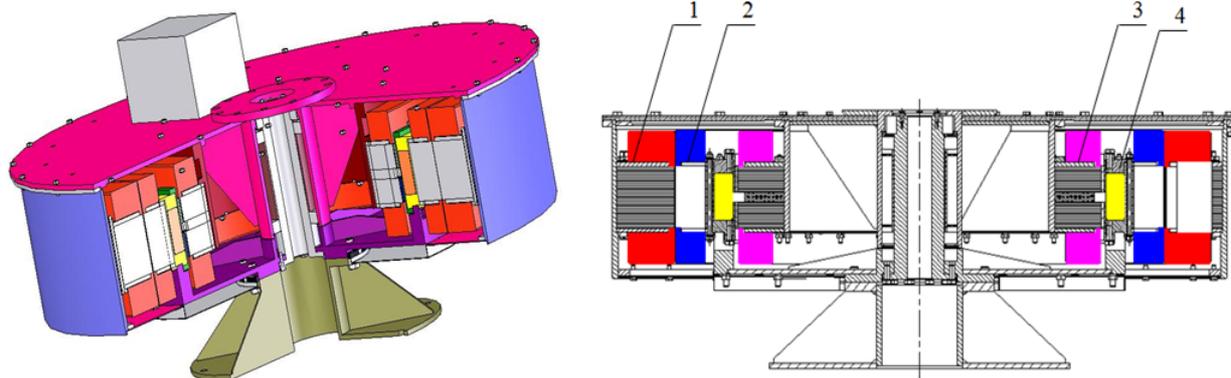


Рис. 11. Конструкция АСГ со встроенным возбудителем

торы мощностью от 0,6 до 10 МВт. Генераторы мощностью до 1,25 МВт имеют воздушный тип охлаждения. Свыше 1,25 МВт – водяное охлаждение. К сожалению, информации по достигнутому КПД на генераторах производства Siemens в свободном доступе найти не удалось, но есть все основания предполагать, что для наиболее мощных машин он составляет около 98 %, возможно и более.

На сегодняшний день в России серийное производство асинхронизированных синхронных турбогенераторов налажено только на заводе «Электросила» в Санкт-Петербурге. Производством генераторов двойного питания именно для ветроустановок никто не занимается. Все перспективные работы проводятся в университетах и НИИ. Одним из таких проектов является разработка генератора двойного питания со встроенным возбудителем [17–19], ведущаяся на кафедре теоретических основ электротехники Южно-Уральского государственного университета. В этом проекте авторы, не претендуя на сам принцип и идею машины двойного питания, предлагают новую конструкцию асинхронизированного синхронного генератора для ВЭУ.

Конструктивно представленный генератор сочетает в себе две электрические машины. Первая – основной генератор: машина двойного питания обращенного типа (рис. 11: поз. 1 – ротор, поз. 2 – статор). Вторая – возбудитель: машина комбинированного возбуждения (рис. 11: поз. 3 – статор, поз. 4 – ротор). Возбудитель в зависимости от скорости вращения питает генератор напряжением определенной величины и частоты. Главные преимущества представленной конструкции – это отсутствие скользящих контактов, так как возбудитель и генератор вращаются на одном валу, а также наличие прямого привода от ВЭУ с вертикальной осью вращения (без редуктора). Эти преимущества значительно повышают надежность системы и позволяют уделять меньше внимания техобслуживанию [20]. На сегодняшний день полностью рассчитана и спроектирована конструкция генератора мощностью 10 кВт. Возможна дальнейшая разработка целой серии генераторов мощ-

ностью до 1 МВт, но для решения этой задачи требуется создание методик расчета, анализа и оптимизации механизма, над чем в настоящее время трудится наша команда. Данная конструкция защищена российским патентом.

### Заключение

1. Ограниченные запасы углеводородов и экологические проблемы являются условиями-стимулами для интенсивного развития альтернативной энергетики. В общем балансе альтернативных источников более половины мощности составляет ветроэнергетика, по этой причине развитие ветроэнергетической отрасли является перспективным направлением научного исследования.

2. Прогресс ветроэнергетики сдерживает основная проблема, которую необходимо качественно решить, – это получение электроэнергии требуемого качества при непостоянном характере воздействия ветра.

3. В архитектуре ВЭУ возможно использование четырех разных типов электрических машин, однако наиболее эффективным методом решения основной проблемы ветроэнергетики является использование принципа машины двойного питания.

4. Существующие аналоги генераторов двойного питания имеют низкую надежность из-за щеточно-контактного аппарата и наличия повышающего редуктора, который усложняет обслуживание и ремонт.

5. В статье предложена конструкция бесконтактного, безредукторного асинхронизированного синхронного генератора, который позволяет обеспечить требуемую надежность и высокую энергоэффективность при приемлемой стоимости. Данный тип генератора является наиболее подходящим решением для ветроэнергетической отрасли.

### Литература

1. Ushakov. V.Y. *Electric power engineering on the basis of renewable energy sources* / V.Y. Ushakov // Springer Verlag. – 2018. – P. 89–140. DOI: 10.1007/978-3-319-62301-6\_5

2. Martyanov, A.S. Modelling of wind turbine performance measurement / A.S. Martyanov, E.V. Solomin // *Journal of Computational and Engineering Mathematics* – 2014. – Vol. 1, no. 2. – P. 18–25.
3. Global Wind Energy Council. – <http://gwec.net>.
4. Обозов, А.Дж. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие для вузов / А.Дж. Обозов, Р.М. Ботпаев. – Бишкек: КГТУ, 2010. – 218 с.
5. Parker, M.A. Comparison of power electronics lifetime between vertical- and horizontal-axis wind turbines / M.A. Parker, C. Soraghan, A. Giles // *IET Renewable Power Generation*. – 2016. – vol. 10. – P. 679–686. DOI: 10.1049/iet-rpg.2015.0352
6. Усовершенствование конструкции генераторов для ветроустановки с аэродинамической мультипликацией / В.И. Панченко, Д.В. Цыпленков, М.С. Кириченко и др. // *Вестник национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия «Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии»*. – 2016. – № 11. – С. 102–109.
7. Сафонов, Ю.А. Обоснование применения преобразователя частоты для стабилизации параметров электрической энергии ветроэлектростанций / Ю.А. Сафонов, М.В. Кундухов // *Известия горского государственного аграрного университета*. – 2015. – Т. 52, № 4. – С. 203–207.
8. Shchur, I. Development and simulation of special rotary transformer – contactless power transmitter and control device for a counter-rotating wind turbine / I. Shchur, A. Kovalchuk // *Rusek Przegląd elektrotechniczny*. – 2015. – Vol. 91, no. 2. – P. 239–242. DOI: 10.15199/48.2015.02.55
9. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений / А.И. Вольдек – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
10. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учеб. / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.
11. Соболев, А.Н. Особенности эксплуатации асинхронных генераторов / А.Н. Соболев // *I Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии развития современной науки»*. – 2016. – С. 107–108.
12. Богдан, А.В. Математическое моделирование асинхронных генераторов / А.В. Богдан // *Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сб. ст. науч.-практ. конф.* – Краснодар: ФГБОУ ВПО «КГАУ», 2016. – С. 301–302.
13. Fujin Deng. Control Strategy of Wind Turbine Based on Permanent Magnet Synchronous Generator and Energy Storage for Stand-Alone Systems / Fujin Deng, Dong Liu, Zhe Chen, Peng Su. // *Chinese Journal of Electrical Engineering*. – 2017. – Vol. 3, no. 1. – P. 51–62.
14. Квитко, А.В. Особенности расчета бесконтактных генераторов электроэнергии / А.В. Квитко, Ю.М. Петренко, М.М. Тарасов // *Политехнический сетевой электронный научный журнал кубанского государственного аграрного университета*. – 2015. – № 112. – С. 991–1002.
15. Dynamics of DFIG controlled by rotor side converter in wind energy / P. Stumpf, J. Berei, I. Nagy, I. Vajk // *IEEE, 5th International Youth Conference on Energy*. – 2015. – P. 446–454. DOI: 10.1109/ITYCE.2015.7180797
16. Шайбеков, А.Ф. Основные характеристики асинхронизированного синхронного генератора на базе машины двойного питания / А.Ф. Шайбеков, Л.Э. Рогинская // *Электротехнические комплексы и системы*. – 2015. – С. 112–117.
17. Kiessh, I.E. Application brushless machines with combine excitation for a small and medium power windmills / I.E. Kiessh, S.A. Gandzha // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – P. 191–194. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.031
18. Gandzha, S.A. Variable speed power / S.A. Gandzha, I.E. Kiessh // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – P. 731–735. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.095
19. Gandzha, S.A. The Comparative Analysis of Permanent Magnet Electric Machines with Integer and Fractional Number of Slots per Pole and Phase / S.A. Gandzha, A.I. Sogrin, I.E. Kiessh // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – P. 408–414. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.137
20. Simoes, M.G. Small wind energy systems / M.G. Simoes, F.A. Farret, F. Blaabjerg // *Electric power components and systems*. – 2015. – Vol. 43, no. 12. – P. 1388–1405. DOI: 10.1080/15325008.2015.1029057

**Котов Антон Андреевич**, аспирант, кафедра «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, aakot@mail.ru.

**Неустроев Николай Игоревич**, ассистент, кафедра «Теоретические основы электротехники», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, neustroev.nikolai@mail.ru.

*Поступила в редакцию 3 апреля 2017 г.*

**USE OF DUAL POWER GENERATOR FOR WIND TURBINES OF SMALL, MEDIUM AND LARGE POWER**

**A.A. Kotov**, *aakot@mail.ru*,

**N.I. Neustroev**, *neustroev.nikolai@mail.ru*

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

The paper considers the relevance of the use of renewable energy sources (RES) in the modern world energy economy, comparative statistics are provided on the share of various energy sources in electricity generation. A particular attention is paid to the use of wind energy as a source for generating electricity, namely, the statistics on the volume and dynamics of the installed capacity of wind power plants (WED) in the world, as well as statistics on the volume and dynamics of the growth of generated electricity with the help of wind turbines in the world. The factors that contributed to the development of the wind power industry in the countries with the greatest share of the use of wind turbines in the world were analyzed. The design of existing types of wind turbines is described. The main technological problem of wind power engineering is formulated and the way to solve this problem is determined. Different types of generators for wind turbines are considered and advantages and disadvantages of using all the types of electric machines as generating devices in wind turbines are analyzed. The vector of development of the wind turbine in the part of the choice of the generator type is determined. The distinctive features and advantages of using a dual-power machine for windmills in comparison with other types of electric machines are shown. The information on the dual-power generators existing in the world and domestic industry is provided. A fundamentally new, detailed design of a dual-power machine with a non-contact exciter installed on a single shaft is presented, and the main advantages of this technical solution regarding the traditional design of a double-feed machine that includes a sliding contact are described.

*Keywords: wind power plants, machine dual power supply, asynchronized synchronous generator, DFIG, wind energy.*

**References**

1. Ushakov V.Y. *Electric Power Engineering on the Basis of Renewable Energy Sources*. Springer Verlag, 2018, pp. 89–140. DOI: 10.1007/978-3-319-62301-6\_5
2. Martyanov A.S., Solomin E.V. [Modelling of Wind Turbine Performance Measurement]. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 18–25.
3. Global Wind Energy Council. Available at: <http://gwec.net>.
4. Obozov A.Dzh. *Vozobnovlyaeime istochniki energii: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Renewable Energy], Bishkek, KG TU Publ., 2010. 218 p.
5. Parker M.A., Soraghan C., Giles A. [Comparison of Power Electronics Lifetime Between Vertical- and Horizontal-Axis Wind Turbines]. *IET Renewable Power Generation*, 2016, vol. 10, pp. 679–686. DOI: 10.1049/iet-rpg.2015.0352
6. Panchenko V.I., Tsyplenkov D.V., Kirichenko M.S. [Improving the Design of Generators for Wind Turbines with Aerodynamic Animation]. *Vestnik natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut. Seriya: Elektricheskie mashiny i elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii* [Bulletin of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Series: Electric Machines and Electromechanic Energy Conversion], 2016, no. 11, pp. 102–109. (in Russ.)
7. Safonov Yu.A., Kundukhov M.V. [The Rationale for the Use of the Frequency Converter to Stabilize the Parameters of the Electric Energy Wind Power Plants], *Izvestiya gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [News of Gorsky State Agricultural University], 2015, vol. 52, no. 4, pp. 203–207. (in Russ.)
8. Shchur I., Kovalchuk A., Rusek A. [Development and Simulation of Special Rotary Transformer – Contactless Power Transmitter and Control Device for a Counter-Rotating Wind Turbine]. *Przeglad elektrotechniczny* [Electrical Review], 2015, vol. 91, no. 2, pp. 239–242. DOI: 10.15199/48.2015.02.55
9. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny: uchebnyk dlya studentov vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy* [Electrical Machines], Leningrad, Energiya Publ., 1978. 832 p.
10. Kopylov, I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnyk* [Designing of Electrical Machines]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2005. 767 p.
11. Sobol' A.N. [Features of Operation of Asynchronous Generators]. *I Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Innovatsionnye tekhnologii razvitiya sovremennoy nauki»* [International Research-to-Practice Conference “Innovative Technologies of Modern Science Development”], 2016, pp. 107–108. (in Russ.)

12. Bogdan, A.V. [Mathematical Modeling of Asynchronous Generators]. *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: sb. stat. nauchno-prakt. konferentsii* [Scientific Support of Agroindustrial Complex: Collection of Papers of Research-to-Practice Conference]. Krasnodar, KGAU, 2016. pp. 301–302. (in Russ.)
13. Fujin Deng, Dong Liu, Zhe Chen, Peng Su. [Control Strategy of Wind Turbine Based on Permanent Magnet Synchronous Generator and Energy Storage for Stand-Alone Systems]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2017, vol. 3, no.1, pp. 51–62.
14. Kvitko, A.V., Petrenko Yu.M., Tarasov M.M. [Features of the Calculation of Contactless Power Generators]. *Politematicheskiiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University], 2015, no. 112, pp. 991–1002.  
(in Russ.) DOI: 10.1109/IYCE.2015.7180797
15. Stumpf, P., Berei J., Nagy I., Vajk I. Dynamics of DFIG Controlled by Rotor Side Converter in Wind Energy. *IEEE, 5th International Youth Conference on Energy*, 2015, pp. 446–454.
16. Shaybekov A.F., Roginskaya L.E. [The Main Characteristics of Asynchronized Synchronous Generator Based on a Dual Power Machine]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy* [Electrotechnical Complexes and Systems], 2015. pp. 112–117. (in Russ.)
17. Kiessh I.E., Gandzha S.A. Application Brushless Machines with Combine Excitation for a Small and Medium Power Windmills. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 191–194. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.031
18. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Variable Speed Power. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 731–735. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.095
19. Gandzha S.A., Sogrin A.I., Kiessh I.E. The Comparative Analysis of Permanent Magnet Electric Machines with Integer and Fractional Number of Slots per Pole and Phase. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 408–414. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.137
20. Simoes M.G., Farret F.A., Blaabjerg F. Small Wind Energy Systems. *Electric Power Components and Systems*, 2015, vol. 43, no. 12, pp. 1388–1405. DOI: 10.1080/15325008.2015.1029057

Received 3 April 2017

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Котов, А.А. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности / А.А. Котов, Н.И. Неустроев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 80–89. DOI: 10.14529/power170409

#### FOR CITATION

Kotov A.A., Neustroev N.I. Use of Dual Power Generator for Wind Turbines of Small, Medium and Large Power. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 80–89. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170409

---