

СОВРЕМЕННЫЕ СХЕМЫ И СПОСОБЫ РАБОТЫ ВЭС В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

АВТОР:

ЕЛИСТРАТОВ В.В.,
 Д.Т.Н.,
 САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
 ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
 УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА
 ВЕЛИКОГО

Современная ветроэнергетика, обеспечивая значительный прирост в электроэнергетике, даже при современном состоянии энергосистемы полностью может обеспечить надежное энергоснабжение и качество электроэнергии.

Существующие методы управления ветропарками, методы прогнозирования прихода ветровой энергии, ее перераспределения и аккумулирования современными техническими средствами обеспечивают устойчивую и надежную работу энергосистемы.

Ключевые слова: ветроэлектростанция; энергокомплекс; энергоснабжение; установленная мощность; способы повышения надежности; маневренность; аккумулирование.



В 2014 г. установленная мощность ВЭС во всем мире составила 372 ГВт, было выработано около 640 ТВт•ч электроэнергии

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ветроэнергетика является одним из наиболее активно развивающихся самостоятельных направлений энергетики. На конец 2014 г. установленная мощность сетевых ветроэлектростанций (ВЭС) в мире превысила 370 ГВт [1], средний ежегодный прирост за последнее десятилетие составляет более 20–25% (рис. 1). В 2014 г. на ВЭС мира было выработано около 640 ТВт•ч электроэнергии, что составило около 4% произведенной электроэнергии, но, например, в Дании свыше 25% электроэнергии вырабатывается из ветра, в Португалии — 18%, Испании — 17% [2], Германии — 9% [3].

СОВРЕМЕННЫЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ МЕГАВАТТНОГО КЛАССА

Промышленностью за последние 30 лет разработана широкая

номенклатура ветроэнергетических установок (ВЭУ) мегаваттного класса с хорошими технико-экономическими показателями. Параметры некоторых ВЭУ этого класса приведены в табл. 1.

За 30 лет единичная мощность серийных ВЭУ возросла с 30 до 7000 кВт (в 230 раз). Диаметр ветроколеса увеличился с 15 до 126 м (в 8 раз). Годовое производство энергии одним агрегатом увеличилось более чем в 600 раз (рис. 2).

За эти годы в конструктивном исполнении лопастей, генераторов, электротехнического оборудования внедрено значительное количество технологических, материаловедческих, аэродинамических, электротехнических разработок, позволивших преодолеть многие «детские» болезни ветроэнергетики, в том числе энергетические, системные, экологические. За счет развития рынка ВЭУ (его объем в настоящее время составляет свыше 100 млрд долл.) снижается удельная стоимость установленного киловатта и себестоимость производимой энергии (безусловно, себестои-

мость в значительной степени зависит и от места расположения ВЭС, и ветрового потенциала). Так, например, в Испании [2] стоимость удельного киловатта находится в диапазоне 1200–1800 евро/кВт, а себестоимость энергии от ВЭС — 40–102 евро/МВт•ч.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

На «заре» развития ветроэнергетики среди политиков, традиционных энергетиков и сетевых операторов в Европе, США также, как сейчас в России, было распространено мнение, что «ветровая энергия слишком изменчива, и невозможно достичь сколь-нибудь значительной доли ее использования в сети, энергия ветра угрожает безопасной эксплуатации электрических сетей, необходимо 100%-е резервирование, когда ветер «останавливается». И это было в определенной степени дей-

ПАРАМЕТРЫ СОВРЕМЕННЫХ ВЭУ МЕГАВАТТНОГО КЛАССА

ВЭУ	Параметры			
	мощность, кВт	диаметр ротора, м	высота расположения оси, м	номинальная скорость ветра, м/с
GE 1.5s/se	1500	70,5	55–65	13
Enercon E82	2000	82	78–138	10
Vestas V80	2000	80	60–100	15
Gamesa G80	2000	80	78	12,5
Repower MM82	2000	82	80	13
Nordex N90	2500	90	80	13
WinWind3	3000	100	80–100	12,5
Siemens 3,6	3600	107	80–90	13
Repower 5M	5000	126	80–100	13
Multibrid 5000	5000	116	90	12
Enercon E126	6000	126	125–131	12

Таблица 1

СРЕДНИЙ ЕЖЕГОДНЫЙ ПРИРОСТ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ СЕТЕВЫХ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ (ВЭС) В МИРЕ

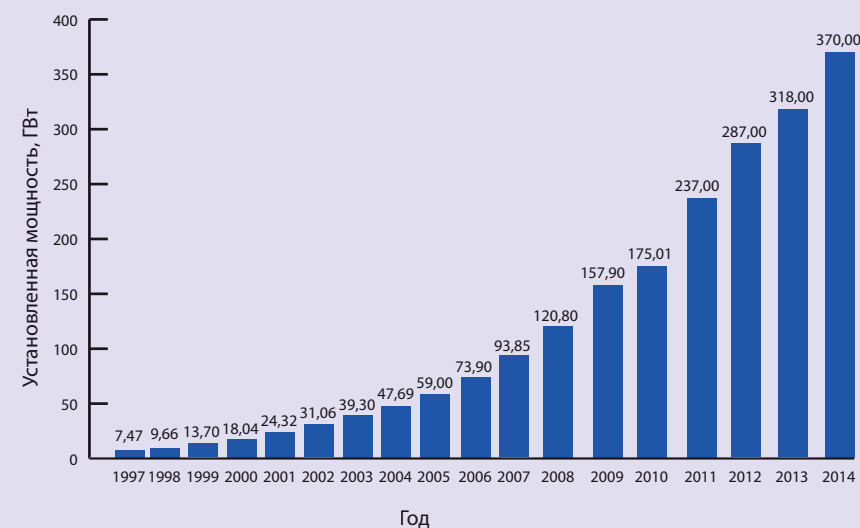
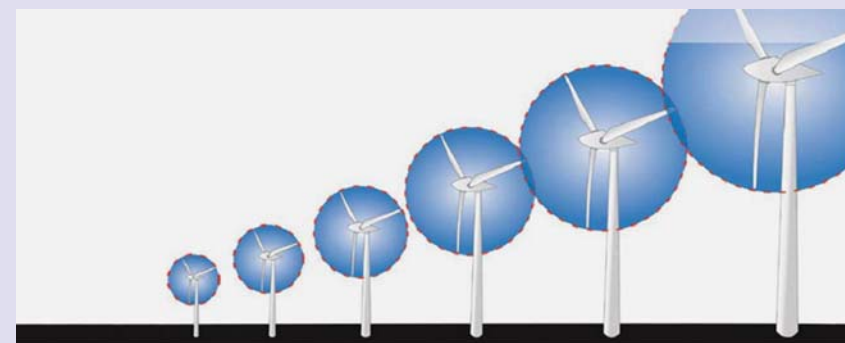


Рис. 1

ПАРАМЕТРЫ И ЕДИНИЧНАЯ МОЩНОСТЬ ВЭУ



Год		1980	1985	1990	1995	2000	2005	2009
Мощность	КВт	30	80	250	600	1500	5000	7000
Диаметр ротора	м	15	20	30	46	70	115	126
Высота башни	м	30	40	50	78	100	90	150
Годовое произ-во э/э	тыс. кВт·ч	35	95	400	1250	3500	17000	20000

Рис. 2

ствительно так, поскольку в связи с несовершенством оборудования и конструкции ветроагрегатов было сложно адаптировать ветроэнергетику под требования эксплуатации в энергосистеме.

Сегодня множество исследований и реальная эксплуатация ВЭС в странах, развивающих энергетику, показали, что опасения сетевых операторов и «мифы» о непредсказуемости ветра и необходимости 100%-го резервирования оказались беспочвенны.

Более того, многолетний опыт эксплуатации крупных ВЭС (в зарубежной литературе встречается термин «ветропарк») (рис. 3) показывает, что поступление энергии от ВЭС достаточно хорошо прогнозируется, и ее энергия успешно продается на рынках мощности и энергии. В среднем точность прогнозирования суточного графика выработки ВЭС в Европе составляет 95%.

Для ВЭС невозможны незапланированные и резкие включения/отключения всей станции, так как она представляет собой группу генерирующих источников, и неисправность одновременно всех ВЭУ невозможна. По статистике вероятность таких факторов, как непредсказуемость графика потребления энергии, вероятность выхода из строя участка ЛЭП или выхода из строя крупного агрегата (несколько сотен МВт) традиционной электростанции, на порядок выше, чем выход из строя всей ВЭС подобной же мощности.

Опыт эксплуатации ВЭС показывает, что существующих резервов энергосистемы достаточно для компенсации колебаний в отдаче мощности при доле ветровой энергии в общем энергобалансе до 20%. При доле свыше 20% имеются проработанные и апробированные мероприятия для успешной интеграции ВЭС в энергосистему.

НОРМАТИВНАЯ БАЗА РАЗВИТИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ОПТОВОМ РЫНКЕ В РФ

Для России, на наш взгляд, одним из факторов осознания понимания, что ВЭС может безопасно эксплуатироваться в крупной энергосистеме, явилось принятие в мае 2013 г. заключительных правовых документов для формирования нормативной базы развития ВИЭ на оптовом рынке:

- Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности»;
- Распоряжение Правительства от 28.05.2013 № 861 «О внесении изменений в Основные направления государственной политики

в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года», утвержденные распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.01.2009 № 1-р.

В Постановлении Правительства РФ № 861-р определены целевые показатели объемов ввода установленной мощности генерирующих объектов, функционирующих на основе ВИЭ. Всего предполагается ввести 5871 МВт установленной мощности объектов ВИЭ, из которых 3600 МВт (или 61%) приходятся на ВЭС, 1520 МВт (26%) — на СЭС и 751 МВт (13%) — на мини-ГЭС. При этом в соответствии с проектом схемы и программы развития ЕЭС России на 2013–2019 гг. объем установленной мощности в ЕЭС России к 2019 г. прогнозируется на уровне 238 ГВт. Таким образом, целевые показатели объемов ввода объектов генерации на основе ВИЭ обеспечат им долю 2,5% в структуре установленной мощности ЕЭС России.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ МАНЕВРЕННОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время можно выделить следующие способы повышения маневренности и надежности энергоснабжения при строительстве и эксплуатации сетевых ВЭС:

1. Укрупнение ветропарков по количеству ВЭУ для сглаживания территориальной неравномерности прихода энергии ветра.
2. Объединение отдельных ветропарков в единый энергокомплекс.
3. Повышение точности прогнозирования прихода ветровой энергии для различных временных промежутков.
4. Объединение крупных ВЭС в энергокомплекс с аккумулирующими системами (АС) для временного перераспреде-



Рис. 3.
Пример построения
ветроэлектрической станции
(ветропарка)

ления и аккумулирования энергии от ВЭС.
5. Использование современных типов ВЭУ, позволяющих оказывать системные услуги и регулировать напряжение в точке присоединения ВЭС к энергосистеме.

Первый способ позволяет достичь следующих эффектов:

1. Неравномерность выработки энергии ветропарком в 10-минутные интервалы снижается с 65% при работе 1 ВЭУ до 5% при работе 200 ВЭУ за счет учета территориальной неравномерности распределения ветра (рис. 4).
2. В 10-минутный интервал колебания мощности крупного ветропарка сопоставимы со случайными колебаниями графика потребления. При доле использования ветровой энергии в 10% может понадобиться резерв мощности 2–4% в зависимости от точности прогноза.
3. При малых временных интервалах (секундных) мощность ВЭС меняется очень незначительно, так как мощность каждой ВЭУ различается в силу неравномерности скоростей ветра по территории и по высоте.

Второй способ повышения надежности позволяет значительно снизить колебания мощности для часовых и суточных интервалов. Так, укрупнение 40 ВЭС, расположенных на большой территории в Германии (рис. 5), в единое энергообъединение позволило за счет снижения ошибки прогноза и выравнивания производства

ВЫРАБОТКА 1 ВЭУ И ВЕТРОПАРКА НА 10-МИНУТНЫХ ИНТЕРВАЛАХ

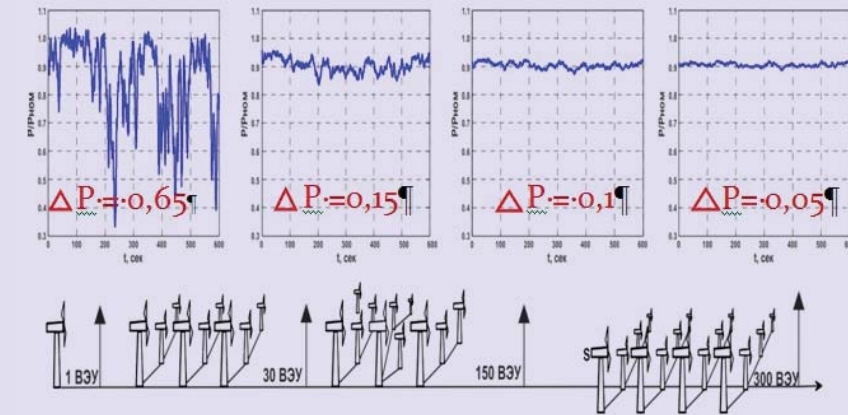


Рис. 4

СНИЖЕНИЕ ОШИБКИ ПРОГНОЗА ПРИ УКРУПНЕНИИ ВЭС В ЕДИНОЕ ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЕ, ГЕРМАНИЯ

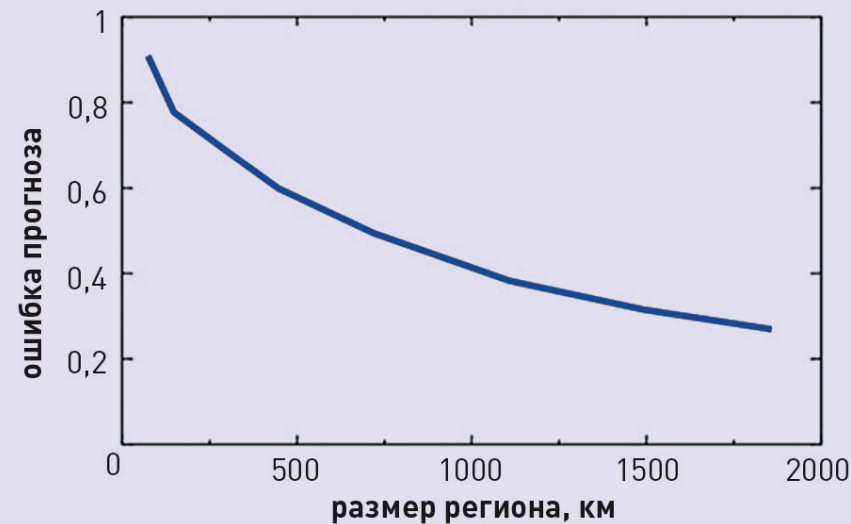


Рис. 5

ОШИБКА ПРОГНОЗА ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ ВЕТРОПАРКАМИ

Ошибка прогноза выработки, %	Для всех четырех зон контроля, Германия, около 1000 км	Для одной зоны контроля (350 км)
На сутки вперед	5,7	6,8
На 4 ч	3,6	4,7
На 2 ч	2,6	3,5

Таблица 2

КПД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ АС [3]

Метод аккумулирования	Потери при накоплении	Потери при хранении и передаче	Всего
Гидроаккумулирование водохранилищем ГЭС	—	0,90	0,90
Суперконденсаторы	0,95	0,95	0,90
Литиевые батареи	0,93	0,93	0,86
Инерционные накопители	0,90	0,90	0,85
Свинцово-кислотные батареи	0,85	0,90	0,77
Регенеративные топливные элементы (ZnBr/VRB/PSB)	0,85	0,77	0,77
Гидравлическое аккумулирование (ГАЭС)	0,85	0,90	0,77
Пневно-воздушное аккумулирование	0,75	0,85	0,64
Сжатый водород	0,70	0,45	0,32
Жидкий водород	0,50	0,45	0,25

Таблица 3

снизить колебания мощности в 3–4 раза.

Третий способ, связанный с повышением точности прогнозирования прихода ветровой энергии к ВЭУ, очень важен для правильного и экономически выгодного участия ВЭС на рынках мощности и энергии. Безусловно, точность прогноза зависит от срока, на который выдается прогноз. Чем уже зона прогноза

и больше интервал, тем больше погрешность прогноза (табл. 2).

В настоящее время активно развиваются методы математического моделирования прогноза выработки на основе статистического анализа предшествующих краткосрочных характеристик ветрового режима [5, 6], а также способы непосредственного измерения ветра перед ВЭУ на различном расстоянии с помощью,

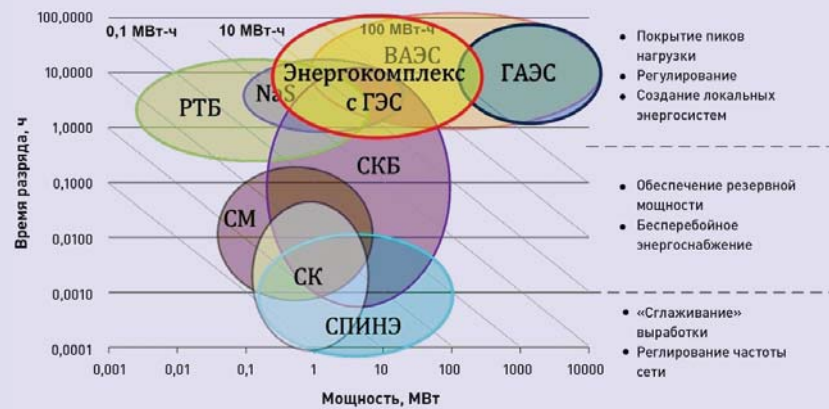
например, размещения на гондole LIDARa [7] и введения этих данных в прогноз выработки.

Четвертый способ повышения надежности работы ВЭС связан с возможностями энергосистемы резервирования мощности и аккумуляции излишков или, наоборот, выдачи мощности и энергии в период дефицита. Возможности быстрого перетока энергии из одного места или одного региона в другой обуславливаются пропускной способностью сети, которая определяется классом напряжения. Чем выше напряжение сети, тем большую мощность можно передать. Поэтому важное значение имеет создание аккумулирующих систем (АС) в «узлах» перераспределения энергии. Важна также «расшивка» узких мест перетока для транзита энергии путем строительства параллельных и дополнительных ЛЭП. Например, сейчас в ЕС активно анализируются пути передачи энергии, например, от офшорных ветропарков в Северном море, путем сооружения дополнительных ЛЭП и АС энергии этих ВЭС.

Выбор АС зависит от ряда факторов, таких как удельная стоимость, энергетическая эффективность, надежность, скорость заряда-разряда и другие. В табл. 3 приведены значения эффективности преобразования энергии для хранения (КПД аккумулирования) различных типов АС, а на рис. 6 приведены области использования различного типа АС в зависимости от емкости и скорости заряда-разряда.

Для аккумулирования больших объемов энергии, характерных для сетевой энергетики, наиболее применимы и эффективны схемы ГАЭС, ВАЭС и ГЭС с водохранилищем годичного или сезонного регулирования. Принцип использования водохранилища ГЭС для аккумулирования энергии ВЭС

ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ АС



Обозначения:
СПИНЭ — сверхпроводящий индукционный накопитель; СК — суперконденсатор; СМ — супермаховик (инерционный накопитель); СКБ — свинцово-кислотные батареи; РТБ — регенеративные топливные батареи; NaS — натрий-серные батареи; ВАЭС — воздушно-аккумулирующая электростанция; Энергокомплекс с ГЭС — АС с использованием водохранилища ГЭС; ГАЭС — гидроаккумулирующая электростанция.

Рис. 6

приведен на рис. 7. Методические основы принципов гидравлического аккумулирования с использованием водохранилища ГЭС приведены в работе [3].

Для оценки возможностей использования аккумулирующих способностей водохранилища ГЭС был разработан программный комплекс и проведены исследования [9] совместной работы Волжской ГЭС мощностью 2530 МВт и планируемого к строительству в этом регионе ветропарка мощностью до 1000 МВт.

Анализ результатов исследований показал, что регулирующие способности водохранилища Волжской ГЭС полностью обеспечивают перераспределение и аккумулирование энергии ВЭС вплоть до мощности 700 МВт без значительных изменений существующих режимов ГЭС. Для эффективного использования энергии от ветропарка более 700 МВт необходимо незначительно скорректировать правила управления режимами работы водохранилища под новые сценарии наполнения.

ПРИНЦИП ГИДРАВЛИЧЕСКОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВИЭ

Обозначения:
 $U_{перем}$ — скорость ветра, попадающая на ветроколесо; $O_{перем}$ — расход реки, притекающей в водохранилище; $O_{регул}$ — расход, протекающий через агрегаты ГЭС; $V_{умо}$ — объем водохранилища ниже уровня мертвого объема (не участвующий в регулировании); $V_{полез}$ — объем водохранилища, участвующий в регулировании мощности ГЭС; $V_{дубл}$ — дополнительный объем водохранилища, используемый для регулирования и аккумулирования энергии ВЭС; РУ — распределительное устройство; $E_{рег}$ — энергия, выдаваемая в соответствии с требуемой нагрузкой.

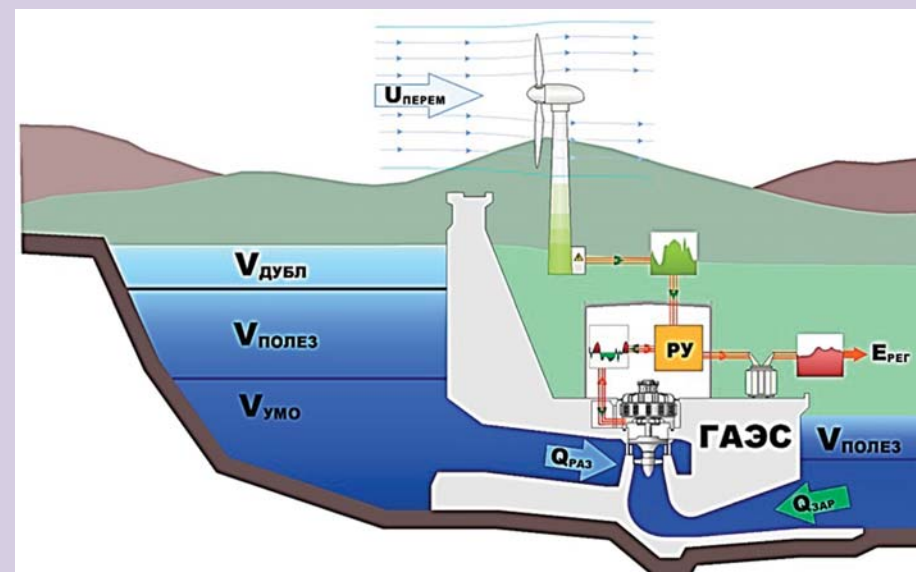


Рис. 7

СУТОЧНЫЙ ГРАФИК ЭК ВЭС-ГЭС (ДЕКАБРЬ СРЕДНЕВОДНОГО ГОДА)

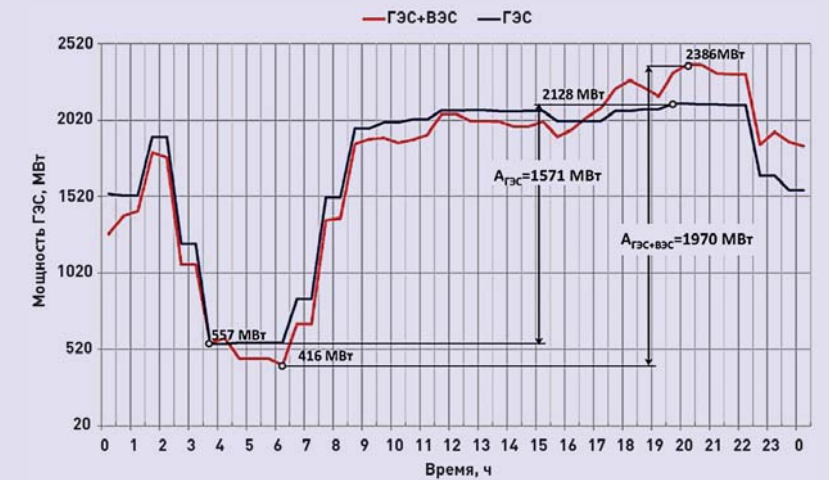


Рис. 8

На рис. 8 и 9 приведены суточный и месячный графики совместной работы Волжской ГЭС и Волгоградской ВЭС (вариант с мощностью ВЭС 500 МВт) в декабре средневодного года, с обеспечением гарантированной мощности ВЭС «на сутки вперед». Объединение ГЭС и ВЭС в единый энергокомплекс обеспечивает также снижение максимальной пропускной способности ЛЭП на 12–15%.

Из рисунков видно, что максимальная доля использования ветровой энергии (до 30% энергии) достигается в энергокомплексе в малопродуктивные периоды года. Это можно рассматривать как эффективное дополнение к гидроэнергии, объем производства которой снижается в этот период года. Использование водохранилища ГЭС позволяет формировать «гарантированную» мощность ВЭС с обеспеченностью до 95%. Объединение ВЭС с ГЭС дает возможность выравнять и перераспределять мощность, выдаваемую ВЭС, и использовать энергию системы ГЭС-ВЭС в пиковые часы нагрузки, что позволит повысить ее экономическую эффективность.

Пятый способ повышения надежности энергоснабжения ВЭС связывают с внедрением новых систем электротехники и силовой электроники при создании современных ВЭУ. На смену устройствам «плавного пуска» и конденсаторным батареям, которые широко применялись в ВЭУ 1980–1990-х гг., пришли современные ВЭУ мегаваттного класса с частотными преобразователями, использующие достижения силовой электроники, в том числе IGBT-транзисторы. В табл. 4 приведены типы современных ВЭУ с системами управления и генераторами и их доля на рынке. Как видно из таблицы, доля такого оборудования на рынке уже превышает 60% и постоянно увеличивается.

ВЭУ с системой двойного питания и вставкой постоянного тока (также их называют ВЭУ с асинхронизированным

синхронным генератором) производятся компаниями GE (1,5; 3,6 МВт), Repower, Vestas, Nordex, Gamesa, Suzlon.

МЕСЯЧНЫЙ ГРАФИК ВЫРАБОТКИ ВОЛГОГРАДСКОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА ГЭС-ВЭС (ДЕКАБРЬ СРЕДНЕВОДНОГО ГОДА)

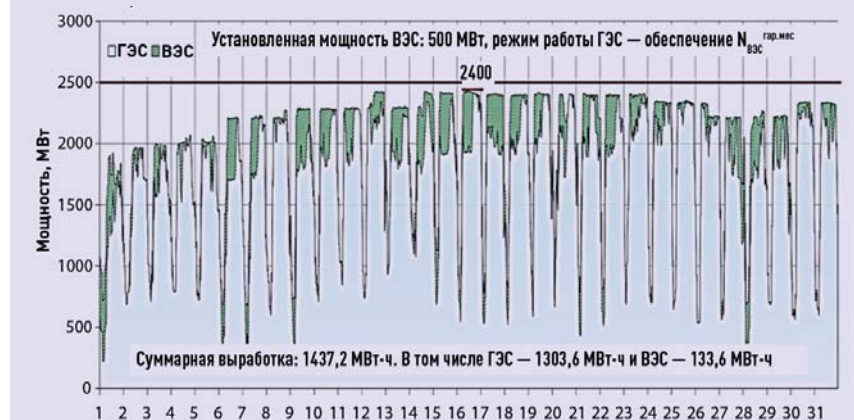


Рис. 9

ВЭУ с полным преобразованием энергии (или ВЭУ с асинхронным/синхронным генератором и полномасштабным преобразователем частоты) производятся компаниями Enercon, GE (2 МВт), Winwind, Siemens, Multibrid M5000. В этом случае используются как асинхронные генераторы, так и синхронные генераторы (в том числе СГ на постоянных магнитах и в безредукторном исполнении в связи с дешевизной магнитных материалов в Китае и высоким ростом ветроэнергетической отрасли в данной стране).

СОВРЕМЕННЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ВЕТРО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Современные принципы управления параметрами ВЭУ делятся на два вида:

- аэродинамические;
- электромеханические.

Принципы аэродинамического управления делятся на два основных способа регулирования лопастей ветроколеса:

- пассивное регулирование (срыв потока), когда лопасти ВК конструктивно зафиксированы (в зарубежной литературе — регулирование *passivestall*, или более современный термин — регулирование *activestall*);
- активный тип регулирования, когда лопасти конструктивно имеют возможность поворачиваться вокруг своей оси, чтобы

КОМПОНОВОЧНЫЕ СХЕМЫ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВЭУ МЕГАВАТТНОГО КЛАССА

Тип установки	Схематичное изображение	Доля на рынке
Ветровая турбина с переменной скоростью вращения с частичным преобразованием энергии		40%
Ветровая турбина с переменной скоростью вращения с полным преобразованием энергии		20%

Таблица 4

ТИПЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ВЕТРОКОЛЕСА

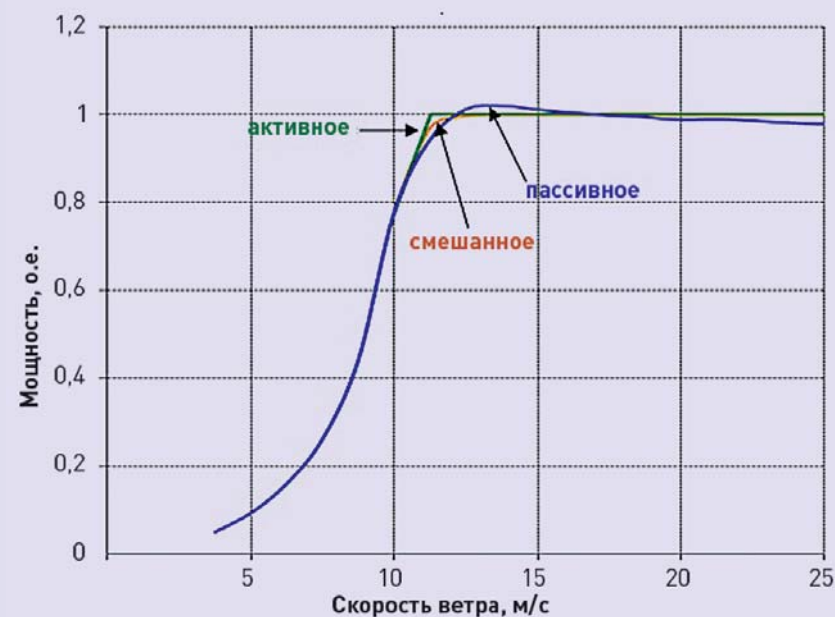


Рис. 10

СХЕМА КОНТРОЛЯ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЕЙ

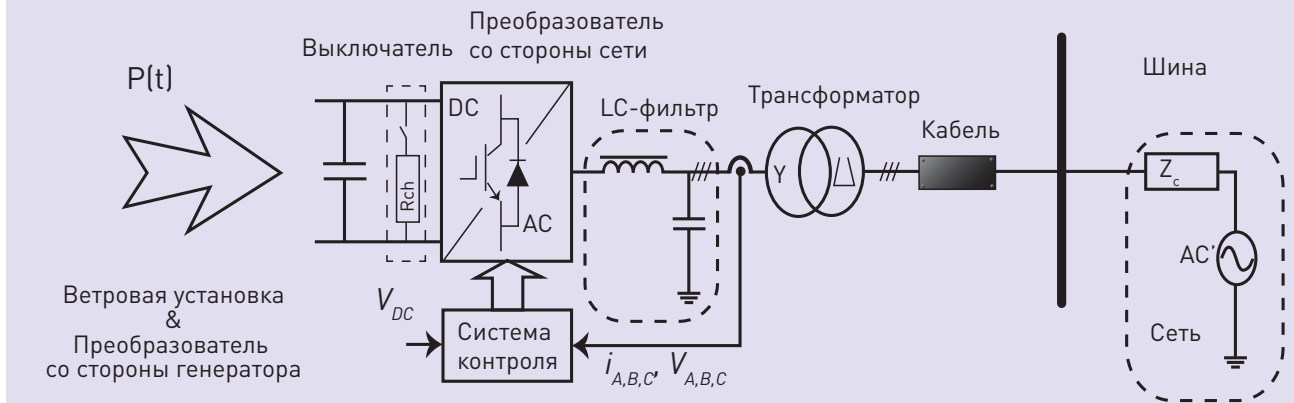


Рис. 11

формировать определенный угол атаки (в зарубежной литературе — регулирование *pitchcontrol*).

Каждый из этих способов имеет аэродинамическую природу, т.е. регулирование осуществляется за счет изменения аэродинамических свойств лопастей ВК. Для контроля частоты вращения ВК существуют два механических способа, применяемых как при пассивном, так и при активном аэродинамическом способе регулирования мощностью ВК:

- частота вращения ВК поддерживается постоянной для узкого диапазона скоростей;
- частота вращения ВК переменна для всего диапазона рабочих скоростей ВЭУ.

Изменения характеристики ВЭУ в зависимости от вида аэродинамического регулирования приведены на рис. 10.

При втором виде управления ВЭУ обеспечиваются контроль показате-

лей качества современной силовой электроникой, контроль активной и реактивной мощностей. Схема такой системы контроля и управления приведена на рис. 11.

Таким образом, современные ВЭУ способны сами принимать участие в работе энергосистемы, в том числе управлять ее энергетическими параметрами. Пример участия работы ВЭС с современными ВЭУ в энергосистеме приведен на рис. 12 на примере ВЭС HornsRev (Германия) с 0-00 до 8-00 ч утра с осуществлением балансирования и обеспечением резерва для частотного регулирования.

РАБОТА ВЭС В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ



Рис. 12