

2. В.А. Нейман. Ветроэлектрическая мощность в объединенной энергосистеме // Відновлювана енергетика. 2008.- № 2– С.58-62.
3. М.П. Кузнецов. Методи прогнозування виробітку електроенергії вітровими електростанціями // Відновлювана енергетика. 2010.- № 3 – С.42-47.
4. Мировой опыт интеграции ветропарков значительной мощности в энергосистему // [http://www.ewa.org/051215 Grid report.pdf](http://www.ewa.org/051215%20Grid%20report.pdf)
5. Зорин В.В., Тисленко В.В. Системы электроснабжения общего назначения.- Чернигов: ЧГТУ, 2005.- 341 с.

УДК 621.311.24

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Наумов П.С., студент группы НВИЭ-501, Сокут Л.Д., доцент, канд. техн. наук
Национальная академия природоохранного и курортного строительства

В работе приводятся основные характеристики и направления в развитии параметров ветроэлектростанций за последние пятнадцать лет по мере расширения строительства ветроэлектростанций.

ВВЕДЕНИЕ

Ветроэнергетический сектор в развитии возобновляемых источников энергии (ВИЭ) за последние пятнадцать лет является самым динамичным и высокотехнологическим сектором [1,2]. Ветроэлектростанции (ВЭС) входят в в объединенные энергетические сети (ОЭС) во всем мире и в объединенную энергетическую сеть Украины (ОЭСУ) наряду с традиционными электростанциями - тепловыми, атомными и мощными гидроэлектростанциями.

На рис.1 представлен график роста мощности ВЭС в мире к 2010 году

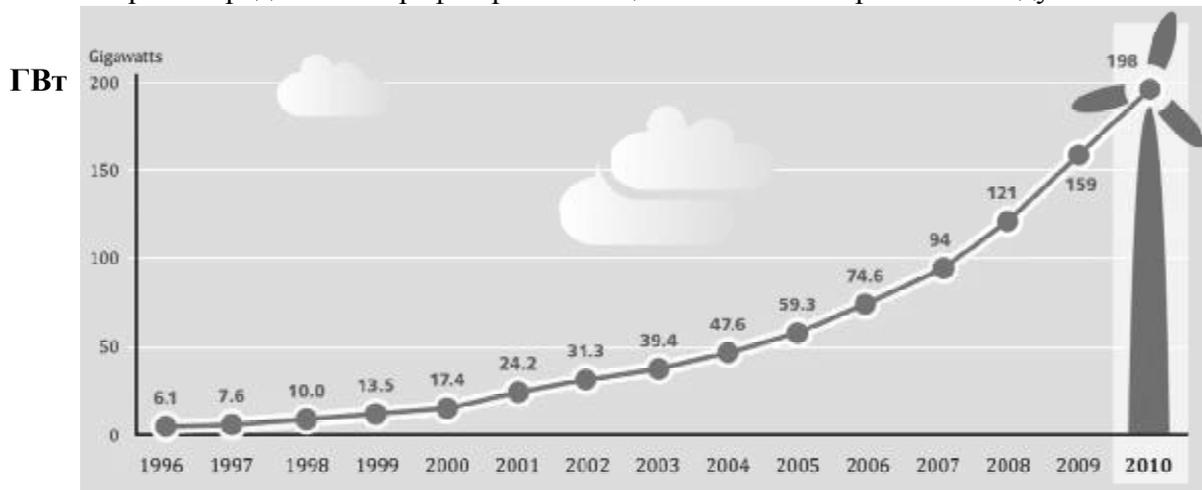


Рис. 1 Установленная мощность ветроэлектростанций в мире к 2010 г.

Прогноз установленной мощности ВЭС в мире от Всемирной Ассоциации Ветроэнергетики (WWEA) на 2011 год составляет 240 ГВт.

Успехи в строительстве и эксплуатации ВЭС в первую очередь обусловлены развитием и совершенствованием ветроэлектростанций (ВЭУ).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Значительный технический прогресс за прошедшие 10...15 лет в создании ВЭУ, особенно, электрогенераторов (ЭГ) и преобразователей параметров электроэнергии в составе ВЭУ позволяет ВЭУ генерировать электроэнергию в широком диапазоне изменения скорости ветра от 2 до 25 м/с. в ОЭС и в ОЭСУ с высоким КПД и стандартными параметрами по напряжению и частоте.

ВЭУ мощностью от 20 кВт до 5...7 МВт производится большинством стран мира. На рис.2 приведен перечень стран и их доля в % в производстве ВЭУ.

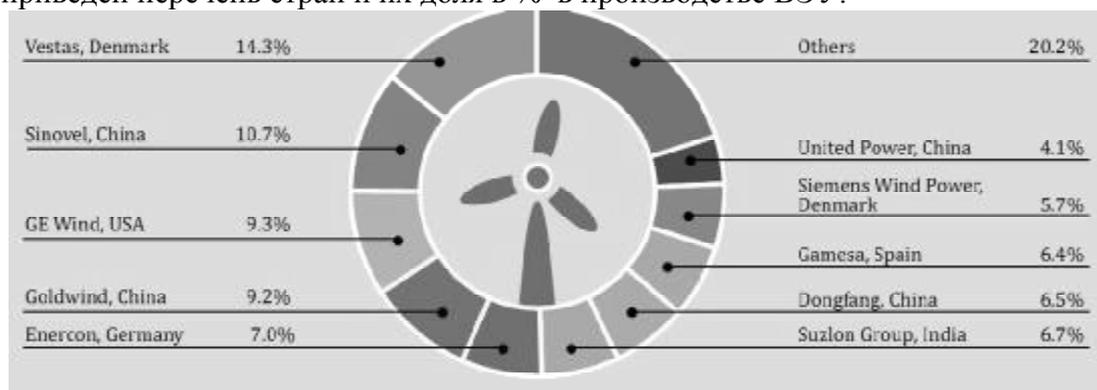


Рис.2. Перечень стран и их доля в % в производстве ВЭУ в мире в 2011 году

Чтобы характеризовать тенденции в развитии параметров ВЭУ, укажем, что выходная электрическая мощность $P_{эл}$ ВЭУ определяется формулой

$$P_{эл} = C_p \rho A V^3 \eta_{BT} \eta_p \eta_{ЭГ}, \quad (1)$$

где C_p - коэффициент, ρ - плотность воздуха, A - площадь круга, ометаемого лопастями ветротурбины (ВТ) при вращении, V - скорость ветра, η_{BT} - КПД ветротурбины, η_p - КПД редуктора, $\eta_{ЭГ}$ - КПД ЭГ.

Из приведенной формулы (1) следует, что для увеличения $P_{эл}$ имеется несколько возможностей, причем в последнее десятилетие наблюдается реализация почти всех из них.

1. Увеличения площади A , равной

$$A = \pi L^2, \quad (2)$$

где L - длина лопасти ВТ, диаметр ВТ $D = 2L$;

2. Увеличение рабочей скорости ветра V , как в результате правильного выбора района сооружения ВЭС, так и за счет увеличения высоты башни ВЭУ, поскольку величина V растет с высотой по соотношению

$$V_h = V_{10} \left[\frac{H}{10} \right]^K, \quad (3)$$

где V_h - скорость ветра на высоте башни, V_{10} - скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью земли, принятая для метеоизмерений, H - высота башни ВЭУ; (высота башни естественно увеличивается с ростом длины лопасти); K - коэффициент, учитывающий изменение скорости ветра от высоты в приземном слое атмосферы. Реализация этих двух возможностей привела к росту параметров ВЭУ согласно табл.1

Таблица 1

Рост параметров ветроэлектростанций за последние 15 лет

$P_{эл}$, кВт	25	250	660	1800	3600	5000	6000	8000
D , м	10	25	48	80	105	125	130	140
H , м	18	30	50	60	74	100	140	170

Все ВЭУ имеют типовую характеристику регулирования выходной электрической мощности $P_{эл}$ от скорости ветра V - рис. 3. На участке 1 ВТ работает с постоянным углом поворота лопастей по отношению к направлению скорости ветра, на участке 2 угол поворота лопастей регулируется с целью поддержания постоянной мощности $P_{эл}$ при росте скорости ветра. Поворот всех трех лопастей производится синхронно с помощью весьма сложного механизма.

Особо следует заметить, что существенно расширен диапазон рабочих скоростей ветра. Начальная скорость снизилась от 5 м/с до 2,0 - 2,5 м/с, максимальная скорость возросла от 15 м/с до 25 м/с.

Снижение начальной скорости ветра $V_{нач}$, при которой начинается выработка электроэнергии - от 5 м/с в девяностые годы до 2,0 м/с к 2008 году, привело к повышению

эффективности ВЭС в районах с относительно небольшими скоростями ветров, в частности, в Украине.

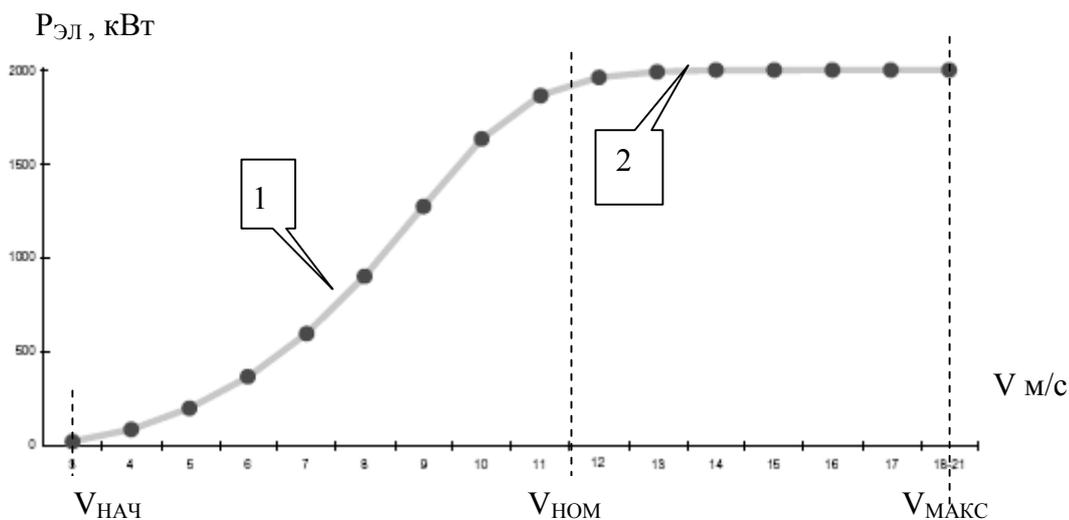


Рис. 3. Типовая характеристика зависимости мощности ветротурбины от скорости ветра

Особое внимание в настоящее время уделяется тщательному измерению средней многолетней скорости ветра в районе сооружения ВЭС и выбору ВЭУ с соответствующей этому району номинальной скоростью $V_{НОМ}$ (рис. 3), при которой ВЭУ выходит на номинальную установленную мощность.

Эффективность ВЭС, как и всех других электростанций, характеризуется, в первую очередь, коэффициентом использования установленной мощности (КИУМ). Например, для тепловых и атомных станций КИУМ имеет значение не меньше 0,67...0,9. Для ВЭС при неправильном выборе ВЭУ по величине $V_{НАЧ}$ и $V_{НОМ}$, значение КИУМ может не превысить 0,1...0,2. С 2005...2007 гг. европейские фирмы-изготовители ВЭУ требуют для предполагаемого района сооружения ВЭС проводить измерения скорости ветра в течение 2...3 лет на высоте башни выбранной ВЭУ во многих точках площадки ВЭС. При наличии таких данных фирма-изготовитель ВЭУ гарантирует значения КИУМ не менее 0,3...0,4.

3. Повышения всех значений КПД в формуле (1) и, в первую очередь, за счет исключения редуктора между ВТ и ЭГ; исключение редуктора дало толчок к развитию новых схем ЭГ и преобразования электрической энергии ВЭУ.

В настоящее время все выпускаемые ВЭУ имеют ВТ с трехлопастным ротором с горизонтальной осью вращения, но отличаются схемными решениями системы преобразования и генерирования электрической энергии.

В начале развития ветроэнергетики первые ВЭУ мощностью до 20 кВт выполняли с ЭГ постоянного тока напряжением 12 В или 24 В для автономного использования. В дальнейшем, при сооружении ВЭС, основное развитие получили ВЭУ с ЭГ для работы в стандартной сети электроснабжения переменного тока частотой 50 Гц.

Особенностью ВЭУ является то, что в данном случае использование стандартных ЭГ тепловых электростанций различной мощности затруднено, поскольку ВТ, в отличие от паровой турбины или двигателей внутреннего сгорания, является тихоходной и имеет частоту вращения в пределах 8...80 об/мин., тогда как стандартные быстроходные синхронные и асинхронные ЭГ с числом пар полюсов 1...2, рассчитаны на частоту вращения 3000 об/мин. или 1500 об/мин. при частоте электрического тока 50 Гц. Применение тихоходных ЭГ с большим числом пар полюсов неприемлемо для ВТ из-за большого диаметра ротора. По этой причине в большинстве ВЭУ применяется повышающий редуктор между валом ВТ и валом ЭГ. В качестве ЭГ чаще всего в этом случае используют трехфазный асинхронный генератор (АЭГ), частота тока которого не

зависит от частоты вращения в диапазоне рабочих величин скольжения. В последние годы широкое применение нашли АЭГ с фазным ротором и полупроводниковым преобразователем (ПП) в цепи ротора. Мощность ПП в этом случае составляет 30% – 35% от номинальной мощности АЭГ.

Частота вращения вала АЭГ $\Omega_{ЭГ}$ в пределах допустимых величин скольжения s , равна

$$\Omega_{ЭГ} = \Omega_0(1 + s) = \Omega_0[1 - (-s)] \quad (4)$$

где скольжение s равно $s = (\Omega_0 - \Omega_{ЭГ}) / \Omega_0 \quad (5)$

Скольжение s в генераторном режиме АЭГ является отрицательной величиной, так как генераторный режим АЭГ возможен при частоте вращения вала ЭГ

$$\Omega_{ЭГ} > \Omega_0$$

Электрическая схема ВЭУ с АЭГ и ПП в цепи ротора приведена на рис. 4.

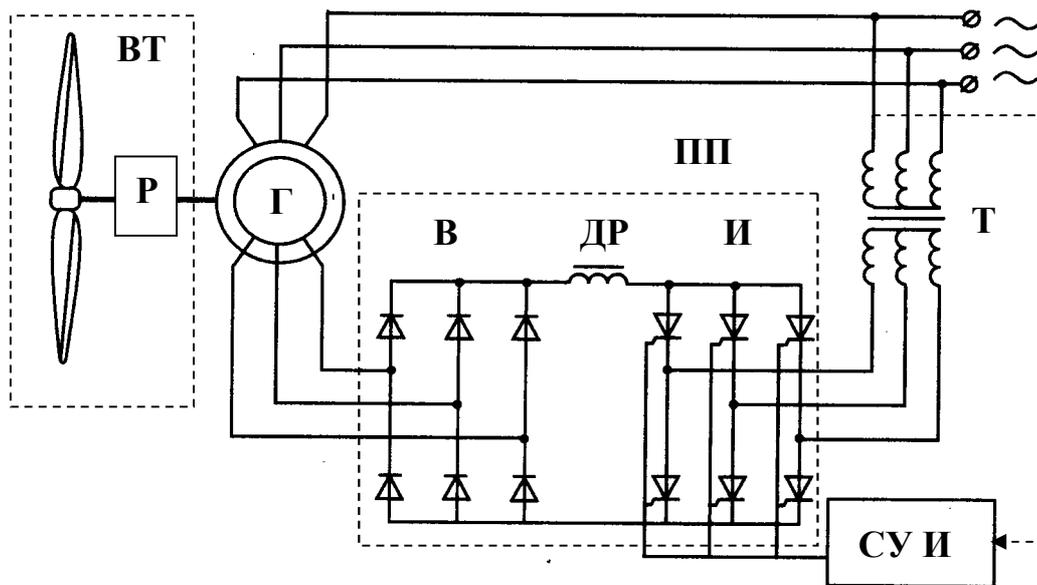


Рис.4 Электрическая схема ВЭУ

ВТ – ветротурбина, **Р** – редуктор, **Г** – трехфазный асинхронный генератор, **ПП** – полупроводниковый преобразователь в цепи обмотки ротора,

В – выпрямитель, **ДР** – сглаживающий дроссель, **И** – инвертор,

Т – согласующий трансформатор, **СУ И** – система управления инвертором

В таком АЭГ мощность генератора расщепляется на два потока – электромагнитная мощность $P_{ст}$, снимаемая в сеть с клемм статорной обмотки, и мощность скольжения P_s , передаваемая в сеть с обмотки ротора через ПП в цепи ротора. При этом улучшается использование аэродинамических характеристик ВТ и расширяется диапазон нерегулируемой части 1 характеристики ВЭУ (рис. 3).

На рис. 5 приведены характеристики АЭГ в нескольких диапазонах s : от 0 до $s'_{кр}$; от $(-0,25)$ до $s''_{кр}$; от $(-0,5)$ до $s'''_{кр}$; от $(-0,75)$ до $s''''_{кр}$; при соответствующих значениях $\beta - \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$.

Как видно из рис.5, семейство характеристик АЭГ в этом диапазоне образуют линию оптимального отбора мощности ВТ по аэродинамическому коэффициенту C_p ВТ.

В табл.1 для примера рассчитаны механические характеристики АЭГ с фазным ротором для ВЭУ типа Gameza G 90 – 2 (производство Испании).

В различных типах ВЭУ широко применяются ЭГ, в которых частота тока, а также значение напряжения, отличаются от соответствующих стандартных параметров внешней электросети. Для согласования параметров электроэнергии ВЭУ и сети используется ПП, выполненный в этом случае на полную номинальную мощность ВЭУ.

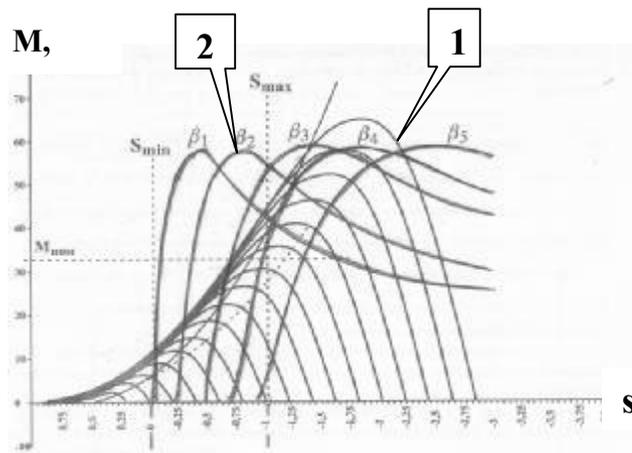


Рис.5. Механические характеристики ВТ и ЭГ в координатах $M = f(s)$
1 – характеристики ветротурбины, 2 – характеристики генератора при изменении
мощности скольжения P_s в цепи обмотки ротора за счет регулирования
угла управления β инвертором

Таблица 2

Некоторые параметры ВЭУ типа Gameza 2-90

Скольжение	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-1
Частота вращения вала АЭГ, об/ мин.	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
Мощность АЭГ, МВт	0,25	0,4	0,52	0,85	1,0	1,35	1,58	1,75	1,9	2,0

Отличительной особенностью новых схем ВЭУ является встраивание ПП внутри ВТ, конструктивно последовательно с корпусом ЭГ.

При мощности ВЭУ свыше 2...3 МВт, в корпусе ВТ встраивается также повышающий трансформатор 0,69/10 кВ, 0,69/35 кВ (напряжение ЭГ – 0,69 кВ, напряжения внешней сети – 10 кВ, или 35 кВ), что упрощает внешнюю электрическую цепь ВЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.М. Мхитарян. Ресурси та перспективи розвитку відновлюваної енергетики України: матеріали XII міжнародної конференції «Відновлювана енергетика XXI століття» (Миколаївка, АР Крим, 12-16 вер. 2011 р.) / Н.М. Мхитарян, С.О. Кудря, Л.В. Яценко. НАНУ, КПІ.- Київ, 2011.- С. 19-22.

2. Конеченков А.Е., Луценко И.Н. Ветроэнергетика мира. Достижения и прогнозы. // Сб. Крым. Стройиндустрия. Энергосбережение. – Симферополь: ЧП «Проекспо Крым», 2008.- С.4-5.

УДК 621.311.24

СОЗДАНИЕ АЛГОРИТМА И РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОУСТАНОВКИ И ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Цеюков А.В., студент группы НВИЭ-501, Иванова Е.В., ассистент

Национальная академия природоохранного и курортного строительства

В работе приводятся результаты создания алгоритма и разработки специальной программы для автоматизации расчета основных параметров выработки электрической энергии отдельной ветроустановкой и ветроэлектростанцией в целом.