

# АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

## Современная ветроэнергетика: тенденции развития, проблемы и варианты их решения

Белей В. Ф., доктор техн. наук

ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»

Харцфельд Э., доктор техн. наук

Высшая техническая школа, г. Штральзунд (Германия)

Пихоцки Я., доктор техн. наук

Варминско-Мазурский университет, г. Ольштын (Польша)



Белей В. Ф.



Харцфельд Э.



Пихоцки Я.

Приведены данные о мировом ветропотенциале и его использовании с помощью современных технологий. Проанализированы проблемы, обусловленные ростом доли ветроэнергетики в энергобалансе энергосистем, и показаны некоторые варианты их решения.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, ветроэнергетическая установка, технический потенциал, мощность, энергосистема.

Мировой ресурс ветровой энергии огромен. Потенциал ее возможностей в конкретном районе — теоретический (валовый) потенциал — определяется удельной мощностью и энергией воздушного потока [1]. Удельная мощность потока

$$P_{в.п}^{уд} [v(t)] = 0,5\rho v(t)^3, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха;  $v(t)$  — скорость ветра.

Недостатком ветроэнергетики является низкая плотность воздуха, обуславливающая небольшую энергию воздушного потока. С этим связано принятие при проектировании ветроэнергетических установок (ВЭУ) больших значений площади их ометаемой поверхности. Несмотря на указанное, суммарный технический потенциал ветровой энергетики  $W_T$  (на суше и в прибрежных акваториях), составляющий, по мнению специалистов [2], несколько процентов валового потенциала  $W_B$ , достигает 278 900 млрд кВт · ч/год [3]. Его можно определить по формуле

$$W_T = W_B C_p \eta_r \eta_p \frac{S_T}{S}, \quad (2)$$

где  $C_p$  — коэффициент использования энергии ветра, зависящий от скорости ветра (изменяется от максимального значения 0,593, оп-

ределяемого по формуле Жуковского — Бенца, до минимального 0,05; достигнутое максимальное значение —  $0,4 \div 0,45$ );  $\eta_r$  и  $\eta_p$  — КПД генератора и редуктора\*;  $S_T$  — площадь, пригодная для возведения ВЭУ [4];  $S$  — площадь региона.

Экономический потенциал ветровой энергии составляет сегодня 0,5 % технического [2]. В долгосрочной перспективе он может достичь 10 – 14 % [3].

В табл. 1 приведены показатели развития мировой ветроэнергетики в период с 2008 по 2022 г. [4], а на рис. 1 показан график ввода ВЭУ в мире и по регионам. Сокращение темпов ввода в эксплуатацию ВЭУ в мире в целом и в ряде стран на конец 2013 г. (кроме Китая и некоторых государств — см. табл. 2), наблюдаемое с 2010 г., является ре-

Таблица 1

| Год  | Установленная мощность, ГВт | Доля вырабатываемой электроэнергии, % |
|------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 2008 | 122                         | 1,5                                   |
| 2013 | 318                         | 4                                     |
| 2022 | 900 (прогноз)               | 7,4                                   |

\* В некоторых ВЭУ редуктор не применяется.

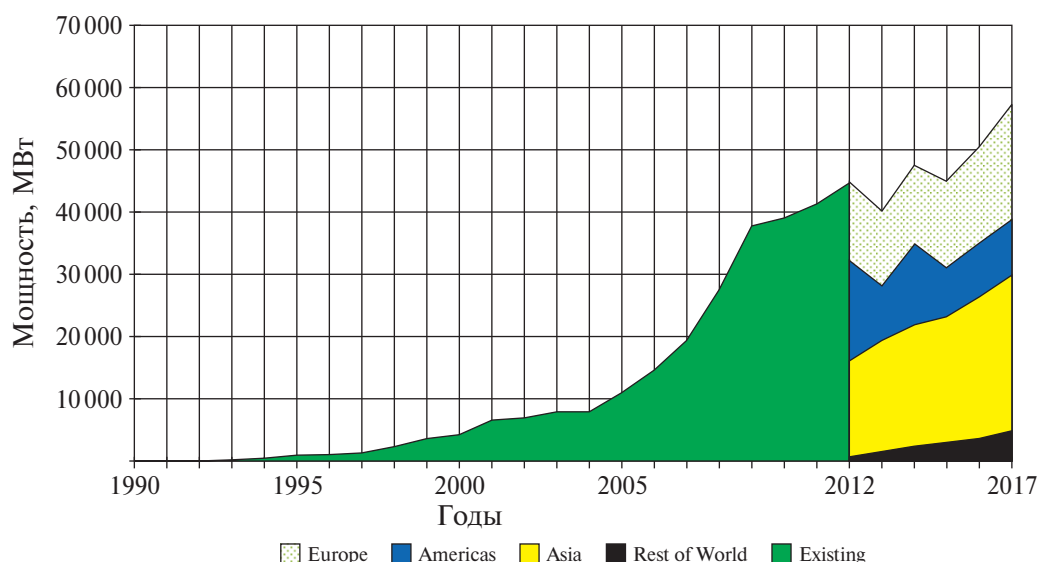


Рис. 1

Таблица 2

| Позиция (рейтинг) | Страна  | Установленная мощность ВЭУ, МВт |                               | Мощность ВЭУ, Вт, на 1 жителя | Ввод новых мощностей, МВт, в 2013 г. |
|-------------------|---------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
|                   |         | Суммарная мощность              | Мощность офшорных ветропарков |                               |                                      |
| 1                 | Китай   | 91 324                          | 389                           | 68                            | 16 000                               |
| 2                 | США     | 61 108                          | —                             | 195                           | 1084                                 |
| 3                 | ФРГ     | 34 660                          | 915                           | 425                           | 3345                                 |
| 4                 | Испания | 22 959                          | 5                             | 491                           | 3345                                 |
| 5                 | Индия   | 20 150                          | —                             | 17                            | 1829                                 |
| 6                 | Англия  | 10 531                          | 3653                          | 168                           | 1883                                 |
| 10                | Дания   | 4772                            | 1271                          | 862                           | 657                                  |
| 14                | Польша  | 3390                            | —                             | 88                            | 657                                  |
| 69                | Россия  | 16                              | —                             | 0,1                           | —                                    |
| Мир               |         | 318 530                         | 7358                          | —                             | 35 530                               |

зультатом снижения государственной поддержки использования ветроэнергетических технологий.

В 2013 г. с использованием ВЭУ в мире было произведено 640 ТВт·ч электроэнергии, т.е. 4 % всей ее выработки. В частности, в энергобалансе Дании доля ветроэнергетики составила 34 %, Испании — 21 %, Португалии — 20 %, Ирландии — 16 %, ФРГ — 9 %. А в РФ суммарная установленная мощность ВЭУ не превышает 16 МВт, хотя еще в конце 50-х годов прошлого века в СССР она составляла более 100 МВт [5]. Вместе с тем Россия

обладает огромным ветропотенциалом. Возможный технический ресурс ветровой энергии без учета возведения морских офшорных ветропарков оценен в [2] в 16 500 млрд кВт·ч при годовой (в 2013 г.) выработке электроэнергии примерно 1045 млрд кВт·ч.

При проектировании ветропарков возникает ряд инженерных задач: оценка ветропотенциала в месте размещения установки; выбор типа ВЭУ; расчет годовой выработки электроэнергии; учет влияния ВЭУ на окружающую среду; определение стоимости ветропарка и себестоимости вырабатываемой

электроэнергии; выявление технической возможности работы ветропарков в составе энергосистемы [6]. Остановимся на некоторых из них.

### Характеристики современных ветроэнергетических установок

С середины 80-х годов прошлого века в мире сменилось примерно 7 поколений ВЭУ с горизонтальной осью вращения (основной тип ВЭУ). Каждое последующее поколение отличается от предыдущих большей единичной установленной мощностью (до 7580 кВт), более высокой степенью автоматизации, решением технических (плавный пуск, потребление или выдача реактивной мощности,

стабилизация напряжения) и экологических проблем. На рис. 2 указаны ведущие фирмы — производители ВЭУ, на долю которых в 2012 г. пришлось 77,4 % от объема мировых поставок [6].

В современных ВЭУ преимущественно используются асинхронные генераторы (АГ) двойного питания (производства фирмы “Vestas” и др.) или синхронные генераторы (СГ) (производства фирмы “Enercon” и др.) — см. рис. 3. Чрезвычайно важно, что ВЭУ могут по заданному алгоритму выдавать или потреблять реактивную мощность, так как уровни напряжений в различных узлах энергосистемы в основном обусловлены ее балансом. Фирма “Vestas” выпускает ВЭУ со следующим рядом мощностей: 1,8; 2; 2,6; 3

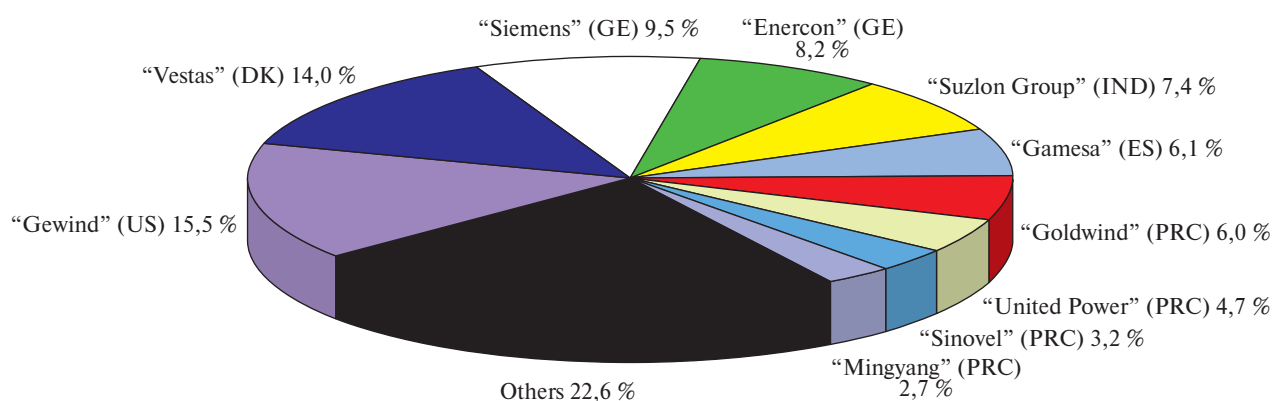


Рис. 2

| Системы преобразования с АГ  | Системы преобразования с СГ и вставкой постоянного тока   |
|--|---|
| <p>АГ с короткозамкнутым ротором</p> <p><math>n = 60(1 + s)f/p</math><br/>Реактивная мощность потребляется</p> | <p>СГ с традиционной системой возбуждения</p> <p><math>n = 60(0,8 - 1,2)f/p</math><br/>Реактивная мощность регулируется</p> |
| <p>АГ с двойным питанием</p> <p><math>n = 60(0,8 - 1,2)f/p</math><br/>Реактивная мощность регулируется</p>     | <p>СГ с постоянными магнитами</p> <p><math>n = 60(0,6 - 1,2)f/p</math><br/>Реактивная мощность регулируется</p>             |

Рис. 3

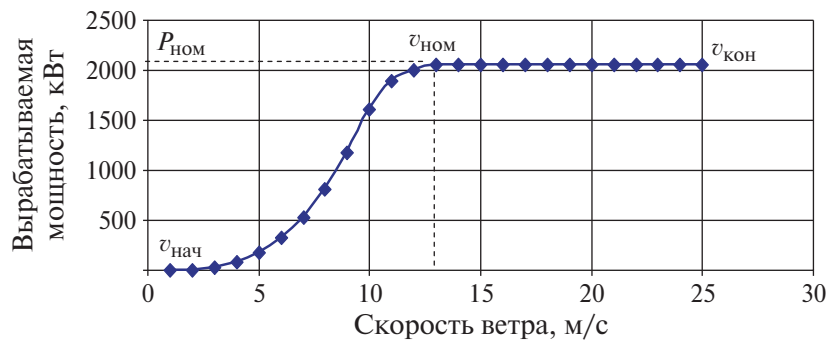


Рис. 4

и 3,3 МВт [7]. Ниже приведены технические данные производимых ею ВЭУ типа V80-2.0 (см. рис. 4):

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| Номинальная мощность $P_{ном}$ , МВт | 2    |
| Высота на уровне ступицы, м          | 80   |
| Скорость, м/с:                       |      |
| $v_{нач}$                            | 4,0  |
| $v_{ном}$                            | 14   |
| $v_{кон}$                            | 25   |
| Диаметр ротора, м                    | 80   |
| Площадь ометаемой поверхности, $m^2$ | 5027 |

Следует отметить, что форма кривой зависимости выдаваемой мощности от скорости ветра для всех ВЭУ одинакова. Различие состоит в значениях начальной  $v_{нач}$ , номинальной  $v_{ном}$  и конечной  $v_{кон}$  (при которой ВЭУ отключается от сети) скоростей ветра.

Фирма “Enercon” производит ВЭУ со следующим рядом мощностей: 0,8; 2; 2,35; 3; 3,05; 7,58 МВт [8], причем ВЭУ E-126/7,58 мощностью 7,58 МВт (рис. 5) является самой мощной в мире. Ниже приведены ее технические данные:

|  |         |
|--|---------|
| Установленная мощность $P_{уст}$ , МВт | 7,58    |
| Высота на уровне ступицы, м            | 135     |
| Скорость, м/с:                         |         |
| $v_{нач}$                              | 3       |
| $v_{ном}$                              | 9       |
| $v_{кон}$                              | 28 – 34 |
| Диаметр ротора, м                      | 127     |
| Площадь ометаемой поверхность, $m^2$   | 12 668  |
| Стоимость, млн евро                    | 11      |

В настоящее время ведущие страны в области использования ветровой энергии проводят замену морально и технически устаревших ВЭУ современными установками. Размещение их на прежней площади позволяет вырабатывать значительно больше электроэнергии вследствие повышения мощности ВЭУ. Увеличение их высоты обуславливает возрастание среднегодовой скорости ветра  $v_{ср}$  на ступице ветроколеса. По значению  $v_{ср}$  на уровне ступицы ветроколеса и зависимости активной мощности, выдаваемой ВЭУ, от скорости



Рис. 5

ветра (см. рис. 4), можно по методике Рейлиха [9] рассчитать годовую выработку электроэнергии:

$$W_{год} = \sum_{t=0}^T f_{y,i} P_i t, \quad (3)$$

где

$$f_{y,i} = \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{v_i - 0,5}{v_{ср}} \right)^2 \right] - \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{v_i + 0,5}{v_{ср}} \right)^2 \right]$$

— частотное распределение Рейлиха для  $i$ -го промежутка времени;  $v_i$  — действительная скорость ветра;  $P_i$  — мощность, выдаваемая ВЭУ в сеть при данной скорости ветра.

#### Подключение ВЭУ и ветропарков к энергосистеме

С увеличением мощностей ВЭУ и ветропарков технические данные электрической

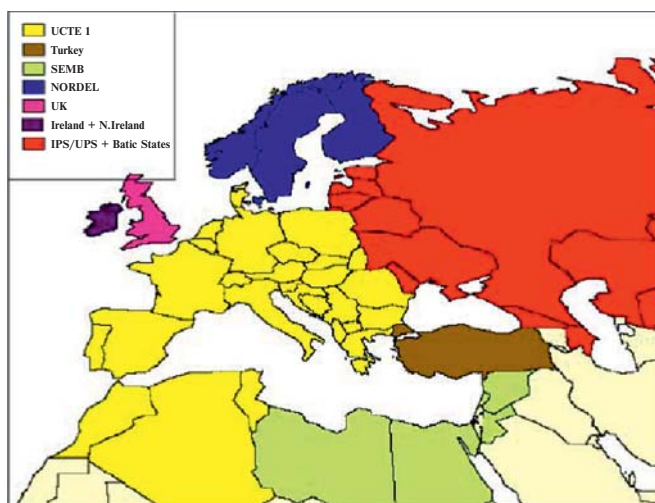


Рис. 6



Рис. 7

Таблица 3

| Характеристика                         | NORDEL | UCTE | IPS/UPS+Baltic States |
|--|--------|------|-----------------------|
| Количество стран                       | 4      | 23   | 14                    |
| Установленная мощность, ГВт            | 90     | 600  | 335                   |
| Производство энергии, млрд кВт · ч/год | 400    | 2500 | 1200                  |

сети и ветроустановок приобретают все большее значение (наряду с такими характеристиками, как ветропотенциал и экологическая совместимость). Дело в том, что при подключении указанных установок к электрической сети можно превысить ее технические возможности, в связи с чем потребуются дополнительные затраты на усиление сети [9]. Поэтому на стадии проектирования следует оценить возможность подключения ветропарка к сети и его воздействие на электрическую сеть при параллельной работе.

Как было указано выше, доля ветроэнергетики в энергобалансе разных стран различная. С учетом резервной мощности и в соответствии с требованиями к устойчивости и надежности работы энергосистем мощность самой крупной электростанции в системе не должна превышать 12 %, а мощность единичного генератора — 2–3 % ее установленной мощности. Поскольку энергосистемы Дании, Испании и других стран входят в энергообъединение UCTE (рис. 6 и табл. 3, в которой приведены характеристики трех европейских энергообъединений), это условие относится к мощности всего энергообъединения.

На рис. 7 показан один из наиболее обсуждаемых и перспективных вариантов создания объединенной европейской энергетической системы. Ее основу составят электростанции, преобразующие энергию возобновляемых источников энергии (ветра, солнца, биомассы, гидро и геотермальную) в электрическую. Системообразующую сеть этой энергосистемы, мощность которой будет очень высока, планируется выполнять линиями постоянного тока. Резкое снижение активной мощности большей части ветропарков маловероятно и прогнозируемо, что позволяет повысить их долю в энергобалансе системы. В последние годы ведутся работы по проектированию и возведению ветрогидроаккумулирующих электростанций, что в значительной степени решает проблему обеспечения баланса активной мощности в системе.

#### Правовая поддержка и критерии оценки окупаемости ветропарков

Важнейшим фактором для внедрения ВЭУ является правовая поддержка ветроэнергетики. Так, принятый в Германии Закон об энергетическом хозяйстве (Energiewirtschaftsgesetz = EnWG) позволяет наладить в стране безопасное, недорогое и эффективное энергоснабже-

ние. Следует отметить, что здесь впервые в мире приняли Закон о возобновляемых видах энергии (Erneuerbare-Energien-Gesetz=EEG), согласно которому зафиксированы льготные цены на экологическое электричество, подаваемое в коммунальные сети [10].

Сроки окупаемости ВЭУ и ветропарков рассматриваются в каждом конкретном случае отдельно. Они обусловлены рядом факторов:

стоимостью сооружения ветропарка, которая зависит от стоимости ВЭУ, проектных работ, земли, прокладки электрической сети и т. д.;

среднегодовой скоростью ветра на высоте ступицы ветроколеса, что определяет количество выработанной электроэнергии;

льготами, предоставляемыми в стране для возобновляемой энергетики.

#### Список литературы

1. **Методы** расчета ресурсов возобновляемых источников энергии / Под ред. В. И. Виссарионова. 2-е изд. — М.: Изд-во МЭИ, 2009.
2. **Ганага С. В., Кудряшов Ю. И., Николаев В. Г.** Ветроэнергетические ресурсы России и перспективы их освоения. — Малая энергетика, 2006, № 1 – 2.
3. **Перспективы** мировой ветроэнергетики. — Гринпис, 2006.
4. **World Market Update 2012.** International Wind Energy Development. Forecast 2013 – 2017, march 2013.
5. **Николаев В. Г., Ганага С. В.** Современное состояние и тенденции развития мировой ветроэнергетики. — Малая энергетика, 2006, № 1 – 2.
6. **Белей В. Ф., Никишин А. Ю.** Ветроэнергетика России: анализ научно-технических и правовых проблем. — Электричество, 2011, № 7.
7. **www.vestas.com**
8. **www.enercon.de**
9. **Eigenerzeugungsanlagen** am Mittelspannungsnetz. Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz. 2. Ausgabe 1998, Hrsg.: VDEW e.v.; VWEW-Verlag, Frankfurt.
10. **Зеленая** энергетика — уже сегодня, но с расчетом на завтра ([www.renewable-made-in-germany.com](http://www.renewable-made-in-germany.com)).

**vbeley@kltu.ru**