

## Электрические генераторы мегаваттной мощности для ветроэнергетики: состояние и тенденции развития

АНТИПОВ В.Н., ГРОЗОВ А.Д., ИВАНОВА А.В.

*Проанализированы современные конструкции и тенденции развития электрических генераторов для ветротурбин материковых и оффшорных ветроэлектростанций. Рассмотрены применяющиеся в мегаваттном диапазоне мощностей три типа генераторов для высокоскоростного, низкоскоростного и безредукторного привода. Определены необходимые электромагнитные нагрузки генераторов и изменение их основных размеров в зависимости от мощности. Отмечена тенденция к применению безредукторных синхронных генераторов с постоянными магнитами для мощностей до 8 МВт. Рассмотрены синхронные генераторы как с радиальным намагничиванием, так и другие варианты (с аксиальным потоком, без ферромагнитных сердечников и др.). Для мощностей 10 МВт и выше существенное уменьшение массы ветротурбины дает применение сверхпроводникового генератора. Однако из-за стоимости сверхпроводника коммерчески выгодный вариант однозначно не определен. Рассматриваются различные проекты (с «теплой», «холодной» сверхпроводимостью), а также варианты как полностью сверхпроводниковых генераторов, так и генераторов только со сверхпроводниковой системой возбуждения.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* синхронный генератор, асинхронный генератор двойного питания, постоянные магниты, сверхпроводимость, безредукторный привод, ветротурбина

Несмотря на возникающие проблемы ветроэнергетика продолжает неуклонно развиваться. В 2017 г. в мире введено в строй 52,57 ГВт новых мощностей, и общая установленная мощность ветроэлектростанций (ВЭС) в мире достигла 539,58 ГВт. Тройка стран-лидеров по общей мощности ветроэнергетики в мире остается прежней: Китай (188,2 ГВт, 35%), США (89 ГВт, 17%) и Германии (56,1 ГВт, 10%) [1]. В Европе за год добавилось 16,8 ГВт, при этом в Германии и Великобритании прирост составил соответственно 6,6 и 4,3 ГВт.

Ветроэнергетика является инновационной технологией, которая в сферу своего развития привлекает интеллектуальные, финансовые и трудовые ресурсы. Создаются новые производства и материалы, что способствует повышению эффективности за счет укрупнения единичной мощности ветроэнергетических установок и снижения удельной стоимости производства энергии. В табл. 1 приведены данные, характеризующие укрупнение единичной ветроэнергетической установки (ВЭУ) за последние 20 лет.

Таблица 1

| Год  | Мощность, МВт | Диаметр ротора, м | Высота башни, м |
|------|---------------|-------------------|-----------------|
| 2000 | 2,0           | 80                | 104             |
| 2010 | 7,5           | 126               | 158             |
| 2015 | 10,0          | 145               | 180             |
| 2020 | 15,9–20,0     | 150–200           | 200–250         |

**Тенденции развития электрических ветрогенераторов и систем их привода.** В составе крупных ВЭС практически перестают использоваться асинхронные генераторы с короткозамкнутым или фазным ротором, применяют только асинхронные генераторы двойного питания (DFIG), синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением (EESG) и синхронные генераторы с постоянными магнитами (PMSG). Для материковых ветрогенераторов ведущие производители установок – Siemens, General Electric Energy, Gamesa, Vestas, Mitsubishi – разработали прототип установки мощностью 4 МВт [2].

Перспективным крупномасштабным направлением современной ветроэнергетики являются оффшорные ВЭС, функционирующие на морском шельфе. По экономическим критериям (дороговизна подводных энергокоммуникаций, фундаментов и монтажа ВЭУ) рентабельны ВЭС, установленные на расстоянии до 40 км от берега и на глубине шельфа не более 35 м. Для морской ветроэнергетики освоен выпуск ветрогенераторов мощностью до 8 МВт. Освоение морской акватории по сравнению с материковой ветроэнергетикой требует больших вложений, для компенсации которых морская ветроэнергетика требует вдвое большей мощности ветрогенератора по сравнению с материковыми установками.

Крупные производители повышают мощность широко используемых редукторных приводов мегаваттного диапазона: 5 МВт PMSG (Gamesa) [3], 6 МВт DFIG (Sinovel) [4], Vestas [5], Enercon [6].

Современная ветротурбина мегаваттного диапазона мощности имеет трехлопастный ротор с горизонтальной осью и электрическим генератором расположенным в гондole (рис. 1), находящейся наверху высокой трубчатой вышки. Ротор диаметром 120–170 м вращается с частотой 5–25 мин<sup>-1</sup>.

Среди действующих имеются турбины с генераторами высокой частоты вращения (~1500 мин<sup>-1</sup>) и многоступенчатым редуктором (1:100), средней частоты вращения (~150 мин<sup>-1</sup>) и одноступенчатым редуктором (1:10) и низкой частоты вращения без редуктора (~15 мин<sup>-1</sup>). Генераторами высокой частоты вращения, как правило, оснащены ветротурбины мощностью 1,5–3,0 МВт, находящиеся в эксплуатации около 20 лет.

В [7] дано сравнение ветротурбины мощностью 3 МВт с различными типами генераторов DFIG, PMSG-DD, PMSG и EESG-DD (DD – прямой привод). Наименьшей массой и стоимостью обладает турбина с DFIG, турбина с приводом PMSG-DD дороже на 32%, с EESG-DD на 77%, а с PMSG-1G – всего на 4%. Турбина, оснащенная безредукторным приводом PMSG-DD, более привлекательна с точки зрения КПД и выработки электроэнергии.

Фирма Siemens в ветровой турбине SWT-3.0-101 реализовала безредукторный привод синхронного генератора с постоянными магнитами. С исключением редуктора упрощается конструкция и повышается надежность ВЭУ. Модель SWT-3.0-101 выполнена с внешним ротором, что позволило сохранить компактные размеры гондолы и транспортировать ее целиком [8]. Затем была создана ВЭУ SWT-6.0-154 мощностью 6 МВт с диаметром ротора 154 м, ее мощность повышена до 7 МВт (SWT-7.0-154) путем оснащения генератора более мощными магнитами [9]. Концерн Siemens придерживается концепции безредукторного привода генератора, считая, что замена главного вала, коробки передач и высокоскоростного генератора низкоскоростным имеет на 50% меньше вращающихся и изнашиваемых частей, что упрощает требования к техническому обслуживанию и особенно важно для

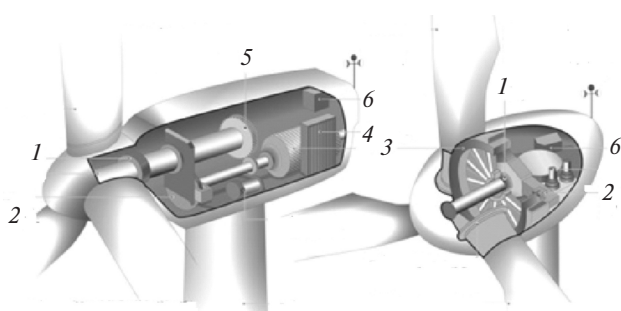


Рис. 1. Размещение оборудования в редукторном и безредукторном приводах турбины: 1 – подшипник лопастей; 2 – тормоз; 3 – генератор; 4 – система охлаждения генератора; 5 – редуктор; 6 – электроника



а)



б)

Рис. 2. Конструкция безредукторного генератора (а) и компоновка его в ВЭУ (б)

оффшорных ВЭС. Низкоскоростной генератор имеет конструкцию с большим диаметром и меньшей активной длиной по сравнению с высокоскоростным генератором и по-иному встраивается в гондолу (рис. 2).

Ветротурбина Enercon E-126 мощностью 7,6 МВт имеет самый большой безредукторный привод с синхронным генератором с электромагнитным возбуждением (EESG), масса которого 220 т, наружный диаметр 12 м и активная длина 1 м [5]. Очевидно, это предельные параметры для низкоскоростной машины с воздушным охлаждением из-за значительных потерь и в роторе, и в статоре.

В [10] выполнено сравнение ветротурбин мощностью 6 МВт с редукторным и безредукторным приводом, приведены данные о массе и стоимости отдельных частей ВЭУ. Гондola ветротурбины, в которой размещено оборудование, составляет 35–36% стоимости ВЭУ для редукторного и 30–35% для безредукторного. Для ветротурбины мощностью 6 МВт разница в цене составляет 10% в пользу редукторного привода. В [10] подчеркивается, что по условиям логистики и монтажа генератора желательно ограничить его массу до 100 т, а внешний диаметр генератора – до 8 м. При увеличении мощности ВЭУ свыше 3 МВт безредукторный привод становится все более привлекательным

с точки зрения повышения надежности, снижения стоимости монтажа и обслуживания. Кроме того, низкоскоростной безредукторный генератор имеет меньший срок окупаемости инвестиций, так как обладает более высоким КПД (каждая ступень редуктора ветрогенератора увеличивает потери примерно на 1% КПД).

**Электромагнитные нагрузки и основные размеры высокоскоростных, низкоскоростных и безредукторных ветрогенераторов.** Определим диаметр расточки статора для ветротурбин мощностью 3 и 6 МВт при различных значениях частоты генератора исходя из критериальных соотношений, связей и зависимостей, установленных теоретическим анализом [11].

Для реализации заданной номинальной кажущейся мощности синхронного генератора  $S_H = P_H \cos \varphi_H$  необходим диаметр расточки статора  $D_1 = \sqrt[3]{C_A S_H / \lambda n}$ , где  $C_A$  – машинная постоянная Арнольда,  $\text{мм}^3 \cdot \text{мин}^{-1} / \text{ВА}$ ;  $P_H$  – номинальная мощность, кВт;  $\cos \varphi_H$  – коэффициент мощности в номинальном режиме;  $\lambda$  – отношение расчетной длины сердечника статора к диаметру;  $n$  – частота вращения вала,  $\text{мин}^{-1}$ .

Машинная постоянная Арнольда  $C_A = 6,1 \cdot 10^7 / A_1 B_\delta \alpha' k_\phi K_{061}$  определяется электромагнитными нагрузками – максимальным значением индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  и линейной нагрузкой обмотки статора  $A_1$ , где  $\alpha'$  – расчетное отношение среднего значения индукции в воздушном зазоре к ее максимальному значению;  $k_\phi = 1,11$  – коэффициент формы кривой поля, представляющий отношение действующего значения ЭДС к среднему;  $K_{061}$  – коэффициент обмотки статора основной гармонической ЭДС.

Значения линейной нагрузки обмотки статора и магнитной индукции в зазоре диаметра для частот вращения 1500 и 150  $\text{мин}^{-1}$  определялись с учетом опыта современного электромашиностроения синхронных машин (СДС3-17-64-6УХЛ4, СДМ32-21-67-40УХЛ4). Нагрузки возрастают при уменьшении частоты вращения, кроме того, при

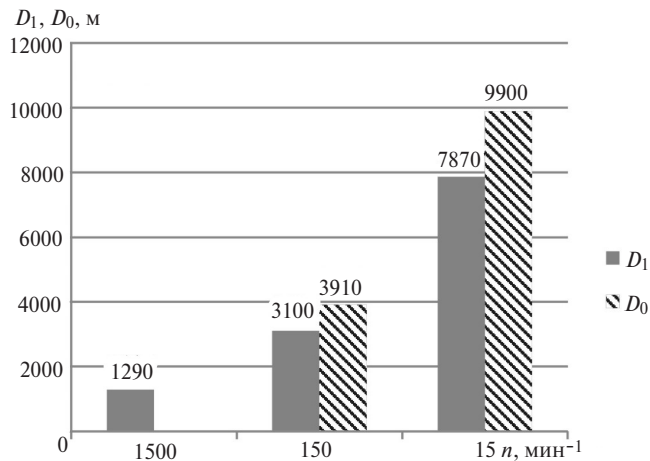


Рис. 3. Изменение внутреннего и внешнего диаметров статора синхронного генератора в зависимости от номинальной частоты вращения

этом изменяются: отношение внешнего диаметра статора к диаметру его внутренней расточки  $D_0/D_1$ , а также отношение активной длины к диаметру расточки статора  $\lambda$ . Полученные результаты представлены в табл. 2 и на рис. 3.

Для мощности 3 МВт рассмотрены варианты многоступенчатого мультипликатора, одноступенчатого мультипликатора и безредукторного привода. Мощность 6 МВт при частоте вращения 1500  $\text{мин}^{-1}$  не реализуема. Для безредукторного привода рассчитаны также мощности 8 и 10 МВт, при этом требуется повысить линейную нагрузку до 100 кА/м и индукцию в воздушном зазоре до 1 Тл, что, скорее всего, потребует интенсификация охлаждения машины.

**Безредукторные ветрогенераторы.** В последнее десятилетие значительная часть международных исследований сосредоточена на создании ветротурбины с безредукторным прямым приводом генератора [12–15].

В [12] приведены параметры безредукторных синхронных генераторов с постоянными магнитами мегаваттного диапазона мощностей, в том числе и проектов на 10 и 20 МВт (см. табл. 3). Интересна отмеченная авторами закономерность: с по-

Таблица 2

| $P$ , МВт | $n$ , $\text{мин}^{-1}$ | $D_1$ , мм | $L_1$ , мм | $\lambda$ | $D_0$ , мм | $A$ , кА/м | $B$ , Тл | $\eta$ |
|-----------|-------------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|----------|--------|
| 3         | 1500                    | 1287       | 579        | 0,45      | 1930       | 40         | 0,6      | 0,96   |
| 3         | 150                     | 3123       | 687        | 0,22      | 3436       | 50         | 0,7      | 0,94   |
| 3         | 15                      | 7869       | 787        | 0,1       | 8262       | 60         | 0,8      | 0,94   |
| 6         | 150                     | 3906       | 859        | 0,22      | 4297       | 50         | 0,7      | 0,96   |
| 6         | 15                      | 9911       | 991        | 0,1       | 10407      | 60         | 0,8      | 0,94   |
| 6         | 15                      | 7836       | 940        | 0,12      | 8620       | 80         | 0,9      | 0,94   |
| 8         | 11                      | 8541       | 1281       | 0,15      | 8735       | 100        | 0,9      | 0,95   |
| 10        | 10                      | 8974       | 1436       | 0,16      | 8855       | 100        | 1,0      | 0,95   |

вышением мощности увеличивается отношение активной длины к диаметру  $\lambda = L_1 / D_1$ , причем это соотношение должно соответствовать не минимальной массе генератора, а минимальной массе турбины. Так, для ВЭУ 10 МВт выбранное соотношение  $\lambda = 0,3$  дает массу синхронного генератора 77 т и массу ВЭУ 240 т, в то время как отношение  $\lambda = 0,16$  определяет минимальную массу синхронного генератора 65 т, а масса ВЭУ возрастает до 325 т. Другими словами, с повышением мощности ВЭУ начинают доминировать неактивные массы. Уменьшение массы  $G_{\text{ген}}$  может быть обеспечено за счет конструктивных решений – установки магнитных подшипников, совмещения подшипника генератора и турбины и т.д. Активная масса генератора может быть снижена путем оптимизации геометрии и сокращения длины пути магнитного потока.

Национальная лаборатория возобновляемой энергии США (National Renewable Energy Laboratory) выполнила исследования по оптимизации генераторов различных типов ветротурбины 10 МВт для оффшорной ВЭС [15]. Анализировались безредукторные синхронные генераторы частотой вращения  $9,6 \text{ мин}^{-1}$  с электромагнитным возбуждением (EESG-DD) и с возбуждением от

постоянных магнитов (PMSG-DD), синхронный генератор с постоянными магнитами частотой вращения  $384 \text{ мин}^{-1}$  с мультипликатором 40:1 (PMSG-MS) и асинхронный генератор двойного питания частотой вращения  $1200 \text{ мин}^{-1}$  с мультипликатором 125:1 (DFIG-HS). В табл. 4 показано сравнение различных типов генераторов и приводов по массе и стоимости.

При оценке общей стоимости ВЭУ, включая не только капитальные затраты, но и затраты на монтаж и обслуживание, разница в рассмотренных проектах не очень значительна. Оценка по выработке электроэнергии (рассматривалась ВЭС 500 МВт из 50 ВЭУ) дала такой же результат. С небольшим преимуществом приоритет отдается синхронному генератору с постоянными магнитами с мультипликатором 40:1 (PMSG-MS). Безредукторный синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов (PMSG-DD) проигрывает только из-за стоимости постоянных магнитов, масса которых 4960 кг вместо 600 кг для PMSG-MS.

**Различные конструкции безредукторного синхронного генератора с постоянными магнитами.** Исследуются не только традиционные конструкции синхронного генератора с радиальным намагничиванием, но и конструкции с аксиальным и попереч-

Таблица 3

| Параметр                            | Мощность P, МВт |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | 3               | 5     | 3     | 5     | 7     | 10    | 10    | 10    | 20    | 8     |
| $n, \text{ мин}^{-1}$               | 16,0            | 12,5  | 16,5  | 12,0  | 9,5   | 7,5   | 10    | 9,6   | 7     | 11    |
| $D_1, \text{ мм}$                   | 5100            | 6100  | 4370  | 6240  | 7500  | 10000 | 8000  | 8940  | 10300 | 6930  |
| $L_1, \text{ мм}$                   | 1350            | 1650  | 1430  | 1600  | 1960  | 2000  | 2400  | 2000  | 4120  | 1100  |
| $\lambda = L_1 / D_1$               | 0,22            | 0,27  | 0,327 | 0,256 | 0,261 | 0,2   | 0,3   | 0,224 | 0,4   | 0,159 |
| $G_{\text{ген}}, \text{ т}$         | 42              | 90    | 24,36 | 39,75 | 58,72 | 81,77 | 77    | 231   | 175   | 43,8  |
| $G_{\text{ген}}/M, \text{ кг/кН·м}$ | 23,46           | 23,56 | 14,0* | 10,0* | 8,34* | 6,42* | 8,06* | 23,22 | 6,41* | 6,3*  |

\*масса активных материалов генератора.

Таблица 4

| Параметр                            | Тип генератора |         |         |         |
|-------------------------------------|----------------|---------|---------|---------|
|                                     | PMSG-DD        | EESG-DD | PMSG-MS | DFIG-HS |
| $D_1, \text{ мм}$                   | 8940           | 8500    | 3200    | 1020    |
| $L_1, \text{ мм}$                   | 2000           | 1930    | 700     | 1530    |
| $\lambda = L_1 / D_1$               | 0,224          | 0,227   | 0,219   | 1,50    |
| $p$                                 | 147            | 67      | 90      | 3       |
| $\eta, \%$                          | 93,0           | 93,0    | 96,5    | 96,27   |
| $Q_{\text{ген}}, \text{ т}$         | 231            | 299     | 27      | 60      |
| $S_{\text{ген}}, \text{ \$/кВт}$    | 111,9          | 49      | 2,3     | 7,3     |
| $S_{\text{ред}}, \text{ \$/кВт}$    | –              | –       | 147,7   | 165,1   |
| $S_{\text{турб}}, \text{ \$/кВт}$   | 1255           | 1196    | 1177    | 1202    |
| $W_{\text{турб}}, \text{ \$/МВт·ч}$ | 127,7          | 126,8   | 124,9   | 126,6   |

\* $p$  – число пар полюсов;  $S$  – удельная стоимость мощности;  $W_{\text{турб}}$  – удельная стоимость энергии.



ным потоками, хотя имеют не только преимущества, но и ряд недостатков. Проект ветротурбины 5 МВт,  $12 \text{ мин}^{-1}$  представлен в [2]. Диаметр статора  $D_1 = 12300 \text{ мм}$ , активная длина 350 мм, индукция в зазоре 0,8 Тл, линейная нагрузка 56,5 кА/м, плотность тока  $5 \text{ А/мм}^2$ . Данных по массе генератора в [2] не приведено, но по активному объему статора синхронный генератор меньше на 12%.

В [13] предложено для безредукторной синхронной машины мощного ветрогенератора использовать конструкцию с встроенными в статор постоянными магнитами, дано сравнение с традиционной конструкцией с постоянными магнитами на роторе и радиальным намагничиванием для мощностей 3; 5; 7 и 10 МВт. Главные размеры генераторов традиционной конструкции представлены в табл. 3. Для мощности 10 МВт предлагаемая конструкция по потерям энергии лучше традиционной на 21%, по массе – на 15%, по стоимости – на 23%.

В [14] представлены результаты проектирования безредукторного синхронного генератора с жидкостным охлаждением, которое позволило увеличить линейную нагрузку машины до 147 кА/м и снизить диаметр расточки статора до 6930 мм. Сравнивая данные генератора мощностью 8 МВт, приведенные в табл. 2 и 3, можно оценить влияние жидкостного охлаждения на размеры машины.

Норвежская технологическая компания Sway Turbine в конце 2012 г. представила новый проект ветротурбины ST-10 мощностью 10 МВт с диаметром ротора 164 м [16]. Синхронный безредукторный генератор с постоянными магнитами не имеет ферромагнитного магнитопровода статора и отличается оригинальной компоновкой генератора с лопастями ротора ветротурбины (рис. 4). Масса предлагаемого генератора на 50–60% ниже, чем у



Рис. 4. ВЭУ ST-10 (Sway Turbine) с синхронным безредукторным генератором с постоянными магнитами без ферромагнитного магнитопровода

традиционного ферромагнитного генератора с постоянными магнитами, а стоимость меньше на 20%.

**Сверхпроводниковые ветрогенераторы мощностью 10 МВт и более.** Снижение массогабаритных показателей и стоимости ВЭУ в диапазоне мощностей более 10 МВт может быть достигнуто разработкой серхпроводниковых синхронных генераторов. American National Renewable Energy Laboratory считает, что начиная с мощности 8 МВт преимущества по объемным, массовым и стоимостным показателям будут на стороне сверхпроводникового генератора [17]. Для создания проекта оптимального сверхпроводникового ветрогенератора 10 МВт необходимо найти баланс между электрическими, магнитными, тепловыми, механическими нагрузками и экономическими факторами. Основной недостаток сверхпроводникового генератора – стоимость сверхпроводниковых материалов, поэтому разрабатываются проекты различных направлений: с «теплой и холодной» сверхпроводимостью, полностью сверхпроводниковые и только со сверхпроводниковой системой возбуждения.

По проекту EcoSwing в Дании (Thyboron) на ветротурбине мощностью 3,6 МВт (рис. 5) магниты заменены керамическим сверхпроводниковым материалом гадолиний-барий-оксид меди  $\text{GdBaCuO}$  [18]. Сверхпроводящая лента защищена от коррозии слоями серебра и оксида магния. Удельная стоимость сверхпроводника оказалась ниже (18,7 \$/кг), чем у редкоземельного постоянного магнита (45,5 \$/кг).

В проекте SUPRAPOWER ветротурбины мощностью 10 МВт, частотой вращения  $8,1 \text{ мин}^{-1}$  применен сверхпроводниковый безредукторный синхронный генератор (рис. 6). Сверхпроводящие катушки ротора изготовлены на основе дигборида магния ( $\text{MgB}_2$ ) и работают при температуре 20 К, криогенное охлаждение обеспечивается двухступенчатым кулером на цикле Гиффорда–Макмагона. Диаметр генератора 15 м, активная длина 520 мм. Предложена концепция модульного вра-



Рис. 5. Ветротурбина мощностью 3,6 МВт с возбуждением на основе сверхпроводящей керамики (проект EcoSwing)

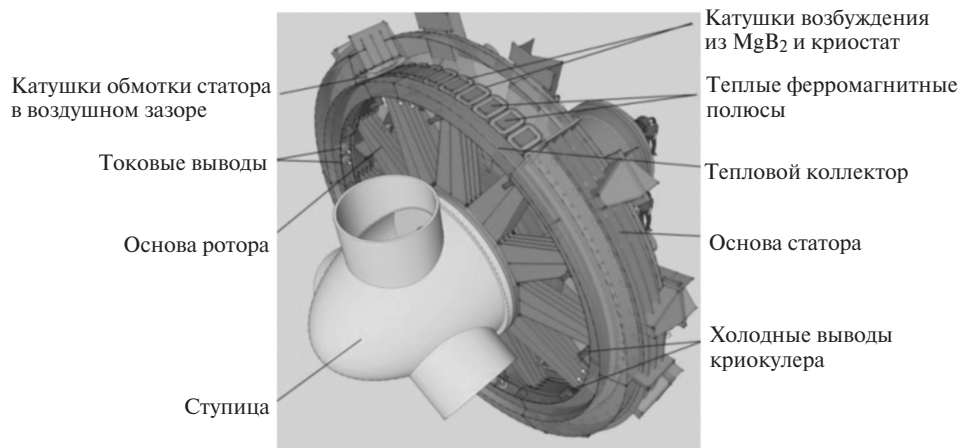


Рис. 6. Сверхпроводниковый безредукторный синхронный генератор мощностью 10 МВт, частотой вращения  $8,1 \text{ мин}^{-1}$  (проект SUPRAPOWER)

шающего криостата, который охлаждает одну катушку. Модули связаны между собой тепловым коллектором. Основное достоинство этого решения – снижение на 30% массы гондолы.

Американской компанией American Superconductor (AMSC) разработан ветрогенератор «Sea Titan» мощностью 10 МВт, диаметром ротора 190 м и безредукторным сверхпроводниковым генератором на основе высокотемпературного сверхпроводника второго поколения  $Re Ba_2Cu_3O_7$  (рис. 7). Диаметр генератора 4,5–5,0 м, масса 150–180 т, КПД 96%, рабочее напряжение 690 В [19, 20].

Электромагнитное моделирование полностью сверхпроводникового ветрогенератора мощностью 10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$  приведено в [22]. Обмотка статора выполнена многожильным проводом из диборида магния  $MgB_2$ , обмотка возбуждения – из оксида иттрия-бария-меди YBCO. Генератор может быть

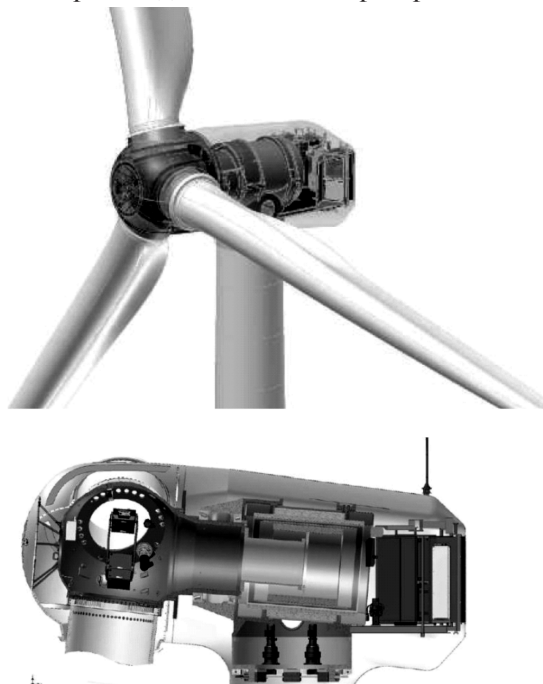


Рис. 7. «Sea Titan» (10 МВт), разработанный AMSC

выполнен на более высокий уровень напряжения 3300 В, внутренний диаметр статора 2662 мм, наружный 3352 мм, активная длина 1500 мм, высота не превышает 4 м.

Компания General Electric разработала проект ветрогенератора с прямым приводом мощностью 10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$ , ротор которого выполнен на основе низкотемпературного сверхпроводника NbTi (рис. 8), что обусловлено хорошо отработанной технологией производства как данного материала, так и изготовления обмоток на его основе [22].

Прогнозируемая стоимость электроэнергии, вырабатываемой сверхпроводниковым ветрогенератором, на 13–18% ниже, чем при традиционном исполнении. Масса генератора 143 т, рабочее напряжение 3300 В.

Advance Magnetic Lab представила проект полностью сверхпроводникового ветрогенератора 10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$  с обмотками ротора и статора на основе диборида магния [23].

**Заключение.** За последние 20 лет единичная мощность ветротурбины оффшорной ВЭС увеличилась в 6 раз и достигла 9,5 МВт при диаметре ро-

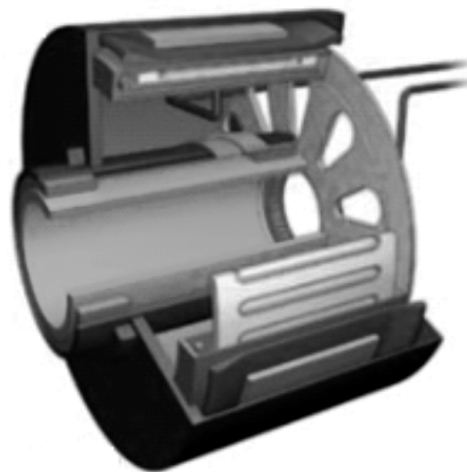


Рис. 8. Низкотемпературный сверхпроводниковый генератор 10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$ , разработанный General Electric

тора 164 м. Стремление к увеличению единичной мощности связано с повышением отношения вращающего момента к массе ветротурбины. Определены необходимые электромагнитные нагрузки генераторов и изменение их основных размеров в зависимости от мощности. Наименьшими массой и стоимостью в пределах 1,5÷10,0 МВт обладают ВЭУ с асинхронным генератором двойного питания с многоступенчатым редуктором, однако безредукторный синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов превосходит редукторный привод по КПД и выработке энергии, более надежен, у него меньше затраты на монтаж и обслуживание. Для мощностей 10 МВт и выше существенное снижение массы ветротурбины дает применение сверхпроводникового генератора, однако из-за стоимости сверхпроводника коммерчески выгодный вариант однозначно не определен. Многие фирмы для оффшорных ВЭС отдают предпочтение безредукторному приводу, при котором достигнуто отношение вращающего момента к массе ветротурбины, равное 25 кг/кН·м, и ищут различные пути снижения его стоимости. Европейские фирмы работают над проектом ветротурбины мощностью 20 МВт, а американские – над ВЭУ мощностью 50 МВт, рассматривая в качестве перспективных безредукторные сверхпроводниковые синхронные генераторы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Оффшорная ветроэнергетика** Европы: итоги 2018 года. [Электрон. ресурс], <https://elektrovesti.net/64470> (дата обращения 16.03.2019).
2. **Yang X., Patterson D., Hudgins J.** Permanent Magnet Generator Design and Control for Large Wind Turbines. – Proc. of Int. Conf. on Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA 2012), Denver (US), Jul. 2012. pp.1-5. Paper 257. DOI: 10.1109/PEMWA.2012.6316367.
3. **Gamesa 5.0 MW.** [Электрон. ресурс] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/768-gamesa-g132-5.0mw> (дата обращения 23.03.2019).
4. **SL6000 Series Wind Turbine** [Электрон. ресурс] <http://sinovel.com/english/content/?109.html> (дата обращения 18.02.2019).
5. **E126 State of the art.** [Электрон. ресурс] <http://www.enercon.de/en-en/66.htm>. (дата обращения 02.02.2019).
6. **Vestas V164-8.0** [Электрон. ресурс] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/318-vestas-v164-8.0> (дата обращения 18.03.2019).
7. **Polinder H., van der Pijl F.F.A., de Vilder G.J., Tavner P.J.** Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. – IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, No. 21(3), pp. 725–733.
8. **Юсупов К.Н., Беляев К.Л.** Ветроэнергетическая установка SWT 3.0-101: безредукторная технология от Siemens. – Турбины и дизели, 2011, № 4, с. 4–9.
9. **Siemens 6.0 MW Offshore Wind Turbine, 2014** [Электрон. ресурс] [https://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/wind%20turbines/6MW\\_direct\\_drive\\_offshore\\_wind\\_turbine.pdf](https://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/wind%20turbines/6MW_direct_drive_offshore_wind_turbine.pdf). (дата обращения 28.02.2019).
10. **Semken R.S., Polikarpova M., Roytta P., Alexandrova J., Pyrhonen J., Nerg J., Mikkola A. and Backman J.** Direct-Drive Permanent Magnet Generators for High Power Wind Turbines: Benefits and Limiting Factors. – IET Renewable Power Generation, 2012, No. 6(1), pp. 1–8.
11. **Антипов В.Н., Кручинина И.Ю.** Проблемные вопросы создания высокоскоростных микротурбогенераторов и пути их решения. – Информационно-управляющие системы, 2012, № 4, с. 25–34.
12. **Bang D., Polinder H., Shrestha G., Ferreira J.A.** Promising direct-drive generator system for large wind turbines. – EPE Journal, 2008, No. 18(3), pp. 7–13.
13. **Zhang J., Chen Z. and Cheng M.** Design and comparison of a novel stator interior permanent magnet generator for direct-drive wind turbines. – IET Renewable Power Generation, 2007, No. 1(4), pp. 203–210.
14. **Alexandrova Y., Semken R.S., Pyrhonen J.** Permanent Magnet Synchronous Generator Design Solution for Large Direct-Drive Wind Turbines. – Int. Review of Electrical Engineering (IREE), 2013, No. 8(6), pp. 1728–1737.
15. **Sethuraman L., Maness M., Dykes K.** Optimized Generator Designs for the DTU 10-MW Offshore Wind Turbine using Generator SE // AIAA SciTech Forum: 35th Wind Energy Symposium, Grapevine, Texas. DOI: 10.2172/1395455.
16. **Permanent magnet generators.** The Switch [Электрон. ресурс] URL: <http://www.theswitch.com/wind-power/permanent-magnet-generators> (дата обращения 14.03.2019).
17. **Marles B., Yand M., Musial W.** Comparative assessment of direct drive high temperature superconducting generators in multimegawatt class wind turbines – National Renewable Energy Laboratory. Technical Report, 2010 [Электрон. ресурс] <http://www.osti.gov/bridge> (дата обращения 30.02. 2019).
18. **Ragheb M.** Modern Wind Generators. NetFiles. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010, 90 p.
19. **AMSC.** Sea Titan TM 10 MW Wind Turbine [Электрон. ресурс] <http://www.amsc.com/documents/seatitan-10-mw-wind-turbine-data-shee> (дата обращения 29.01.2019).
20. **Snitchier G., Gamble B., King C.** 10 MW class superconductor wind turbine generators. – IEEE Trans. Appl. Supercond, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1089–1092.
21. **Liang Y., Rotaru M.D., Sykulski J.R.** Electromagnetic simulation of a fully superconducting 10-MW-class wind turbine generator. – IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 2013, vol. 23 (6), pp. 46–50. DOI: 10.1109/TASC.2013.2277778.
22. **Fair R., Stautner W., Douglass M. et al.** Superconductivity for Large-Scale Wind Turbines. – DOE report Appl. Superconductivity Conf., Portland, Oregon October 11th, 2012.
23. **Advance Magnetic Lab** [Электрон. ресурс] <http://www.magnetlab.com> (дата обращения 14.03.2019).

[17.04.2019]

*А в т о р ы:* **Антипов Виктор Николаевич** – доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник Института химии силикатов имени И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН), диссертацию защитил в 1989 г.

**Грозов Андрей Дмитриевич** – научный сотрудник (ИХС РАН).

**Иванова Анна Владимировна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник РАН (ИХС РАН), диссертацию защитила в 1989 г.



## Megawatt-Range Electrical Generators for Wind Power: State of the Art and Development Trends

**ANTIPOV Viktor N.** (*Russian Academy of Sciences (RAS), Institute of Silicate Chemistry (ISCh), St. Petersburg, Russia*) – *Leading scientist, Dr. Sci. (Eng.)*

**GROZOV Andrei D.** (*RAS ISCh, St. Petersburg, Russia*) – *Scientist*

**IVANOVA Anna V.** (*RAS ISCh, St. Petersburg, Russia*) – *Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)*

*The modern designs and development trends of electrical generators for wind turbines used in continental and offshore windmill farms are analyzed. Three types of generators for high-speed, low-speed, and gearless drives applied in the megawatt range of capacities are considered. The necessary electromagnetic loads of the generators and the change of their main sizes as a function of power capacity are determined. The trend toward using gearless permanent magnet synchronous generators for capacities up to 8 MW is pointed out. Synchronous generators with both radial magnetization and other versions (with an axial flux, without ferromagnetic cores, etc.) are considered. For capacities of 10 MW and higher, the wind turbine mass can be decreased essentially by using a superconducting generator. However, due to the cost of superconductor, the commercially profitable version has not unequivocally been determined. Different projects (with “warm” and “cold” superconductivity), as well as versions involving the use of both fully superconducting generators and generators containing only a superconducting excitation system are considered.*

**Key words:** *synchronous generator, doubly-fed asynchronous generator, permanent magnets, superconductivity, gearless drive, wind turbine*

### REFERENCES

1. **Affshornaya vetroenergetika evropy: itogi 2018 data** [Electron. resurs] <https://elektrovesti.net/64470> (Data obrashcheniya 16.03.2019).
2. **Yang X., Patterson D., Hudgins J.** Permanent Magnet Generator Design and Control for Large Wind Turbines. – Proc. of Int. Conf. on Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA 2012), Denver (US), Jul. 2012. pp.1-5. Paper 257. DOI: 10.1109/PEMWA.2012.6316367.
3. **Gamesa 5.0 MW** [Electron. resurs] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/768-gamesa-g132-5.0mw> (Data obrashcheniya 23.03.2019).
4. **SL6000 Series Wind Turbine** [Electron. resurs] <http://sinovel.com/english/content/?109.html> (Data obrashcheniya 18.02.2019).
5. **E126 State of the art.** [Electron. resurs] <http://www.enercon.de/en-en/66.htm>. (Data obrashcheniya 02.02.2019).
6. **Vestas V164-8.0** [Electron. resurs] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/318-vestas-v164-8.0> (Data obrashcheniya 18.03.2019).
7. **Polinder H., van ser Pijl F.F.A., de Vilder G.J., Tavner P.J.** Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. – IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, No. 21(3), pp. 725–733.
8. **Yusupov K.N., Belyayev K.L.** *Turbiny i dizeli – in Russ. (Turbines and Diesel Engines)*, 2011, No. 4, pp. 4–9.
9. **Siemens 6.0 MW Offshore Wind Turbine.** 2014 [Electron. resurs] [https://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/wind%20turbines/6MW\\_direct\\_drive\\_offshore\\_wind\\_turbine.pdf](https://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/power-generation/renewables/wind-power/wind%20turbines/6MW_direct_drive_offshore_wind_turbine.pdf). (Data obrashcheniya 28.02.2019).
10. **Semken R.S., Polikarpova M., Roytta P., Alexandrova J., Pyrhonen J., Nerg J., Mikkola A. and Backman J.** Direct-Drive Permanent Magnet Generators for HighPower Wind Turbines: Benefits and Limiting Factors. – IET Renewable Power Generation, 2012, No. 6(1), pp. 1–8.
11. **Antipov V.N., Kruchinina I.Yu.** *Informatsionnye-uravlyayushchiye sistemy – in Russi.* (Management Information Systems), 2012, No. 4, pp. 25–34.
12. **Bang D., Polinder H., Shrestha G., Ferreira J.A.** Promising direct-drive generator system for large wind turbines. – EPE Journal, 2008, No. 18(3), pp. 7–13.
13. **Zhang J., Chen Z. and Cheng M.** Design and comparison of a novel stator interior permanent magnet generator for direct-drive wind turbines. – IET Renewable Power Generation, 2007, No. 1(4), pp. 203–210.
14. **Alexandrova Y., Semken R.S., Pyrhonen J.** Permanent Magnet Synchronous Generator Design Solution for Large Direct-Drive Wind Turbines. – Int. Review of Electrical Engineering (IREE), 2013, No. 8(6), pp. 1728–1737.
15. **Sethuraman L., Maness M., Dykes K.** Optimized Generator Designs for the DTU 10-MW Offshore Wind Turbine using Generator SE // AIAA SciTech Forum: 35th Wind Energy Symposium, Grapevine, Texas. DOI: 10.2172/1395455.
16. **Permanent magnet generators.** The Switch [Electron. resurs] URL: <http://www.theswitch.com/wind-power/permanent-magnet-generators> (Data obrashcheniya 14.03.2019).
17. **Marles B., Yand M., Musial W.** Comparative assessment of direct drive high temperatura superconducting generators in multimegawatt class wind turbines – National Renewable Energy Laboratory. Technical Report, 2010 [Electron. resurs] <http://www.osti.gov/bridge> (Data obrashcheniya 30.02. 2019).
18. **Ragheb M.** Modern Wind Generators. NetFiles. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010, 90 p.
19. **AMSC.** Sea Titan TM 10 MW Wind Turbine [Electron. resurs] <http://www.amsc.com/documents/seatitan-10-mw-wind-turbine-data-shee> (Data obrashcheniya 29.01.2019).
20. **Snitchier G., Gamdle B., King C.** 10 MW class superconductor wind turbine generators. – IEEE Trans. Appl. Supercond, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1089–1092.
21. **Liang Y., Rotaru M.D., Sykulski J.R.** Electromagnetic simulation of a fully superconducting 10-MW-class wind turbine generator. – IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 2013, vol. 23 (6), pp. 46–50. DOI: 10.1109/TASC.2013.2277778.
22. **Fair R., Stautner W., Douglass M. et al.** Superconductivity for Large-Scale Wind Turbines. – DOE report Appl. Superconductivity Conf., Portland, Oregon October 11th, 2012.
23. **Advance Magnetic Lab** [Electron. resurs] <http://www.magnetlab.com> (Data obrashcheniya 14.03.2019).

[17.04.2019]