

## Сверхпроводниковые ветрогенераторы мощностью 10 МВт и более (Обзор зарубежных публикаций)

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

*Разработка и создание сверхпроводниковых синхронных генераторов позволит улучшить массогабаритные показатели и снизить стоимость ветроэнергетических установок в диапазоне мощности более 10 МВт. В статье анализируются зарубежные концептуальные проекты сверхпроводниковых синхронных генераторов в различных направлениях: с теплой и холодной сверхпроводимостью, полностью сверхпроводниковые или только со сверхпроводниковой системой возбуждения; применяются различные материалы ( $MgB_2$ ,  $Bi-2223$ ,  $YBCO$ ). Основным препятствием на пути коммерческого использования сверхпроводникового генератора является высокая стоимость сверхпроводниковых материалов. Учитывая существующее состояние технологии производства и стоимость сверхпроводников, делается вывод о том, что перспективы на ближайшее внедрение имеет синхронный безредукторный сверхпроводниковый ветрогенератор мощностью 10 МВт с обмоткой возбуждения из ВТСП материала ( $MgB_2$ ,  $Bi-2223$  или  $YBCO$ ) топологии «ферромагнитный статор – ферромагнитный ротор», при диаметре статора 7–9 м, с числом полюсов 32–40.*

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, синхронные сверхпроводниковые ветрогенераторы, направления проектирования, препятствие коммерческого применения, перспективные проекты

Уменьшение массогабаритных показателей и снижение стоимости ветроэнергетических установок (ВЭУ) мощностью более 10 МВт могут быть достигнуты при создании сверхпроводниковых синхронных генераторов. American National Renewable Energy Laboratory считает, что начиная с мощности примерно 8 МВт преимущества по объёмным, весовым и стоимостным показателям будут на стороне сверхпроводникового генератора [1]. При проектировании оптимального сверхпроводникового ветрогенератора 10 МВт необходимо найти баланс между электрическими, магнитными, тепловыми, механическими нагрузками и экономическими факторами. Основное препятствие при разработке сверхпроводникового генератора сегодня – это высокая стоимость сверхпроводниковых материалов, поэтому создание проектов в различных направлениях: с теплой и холодной сверхпроводимостью, полностью сверхпроводниковые или только со сверхпроводниковой системой возбуждения.

Первый действующий ветроагрегат на основе сверхпроводимости создан по проекту EcoSwing в Дании (рис. 1). На генераторе мощностью 3,6 МВт магниты были заменены на керамический сверхпроводниковый материал гадолиний-барий-оксид меди ( $GdBaCuO$ ) [2]. Сверхпроводящая лента защищена от коррозии слоями серебра и оксида магния. Удельная стоимость сверхпроводника оказа-

лась ниже (18,7 \$/кг), чем редкоземельного постоянного магнита (45,5 \$/кг).

В [3] рассмотрен проект SUPRAPOWER ветротурбины мощностью 10 МВт с частотой вращения  $8,1 \text{ мин}^{-1}$  со сверхпроводниковым безредукторным синхронным генератором. Сверхпроводящие катушки ротора изготовлены на основе диборида магния ( $MgB_2$ ) и работают при температуре 20 К, криогенное охлаждение обеспечивается двухступенчатым кулером на цикле Гиффорда–Макмагона. Диаметр генератора 10,1 м, активная длина 744 мм. Предложена концепция модульного вращающегося криостата, который охлаждает одну катушку. Модули связаны между собой тепловым коллектором. Основное достоинство этого решения – снижение на 30% массы гондолы.



**Рис. 1.** Ветрогенератор мощностью 3,6 МВт с возбуждением на основе сверхпроводящей керамики (проект EcoSwing)

Американская фирма American Superconductor (AMSC) в 2012 г. спроектировала ветротурбину «Морской Титан» (SeaTitan) [4] мощностью 10 МВт с диаметром ротора 190 м, высотой башни 125 м для работы со скоростями ветра 4–11,5 м/с, с безредукторным высокотемпературным сверхпроводниковым генератором на основе высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) второго поколения  $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (30 К) с частотой вращения  $10 \text{ мин}^{-1}$ . Диаметр генератора составляет 4,5–5,0 м, масса 150–180 т, КПД 96%, рабочее напряжение 690 В [4, 5]. В коммерческую эксплуатацию данный агрегат пока не поступил, его концепция показана на рис. 2.

Компания General Electric разработала проект безредукторного ветрогенератора мощностью 10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$ , ротор которого выполнен на основе низкотемпературного сверхпроводника  $\text{NbTi}$ , что было обусловлено наличием хорошо отработанной технологии как производства данного материала, так и изготовления обмоток на его основе. Поперечное сечение генератора представлено на рис. 3. Прогнозируемая стоимость электроэнергии, вырабатываемой таким сверхпроводниковым ветрогенератором, ожидается на 13–18% ниже, чем у ветрогенератора традиционного исполнения. Масса генератора 143 т, рабочее напряжение 3300 В [6].

Advance Magnetic Lab разработала проект полностью сверхпроводникового ветрогенератора 10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$  с обмотками ротора и статора на основе диборида магния [7].

Компания Kalsi Green Power Systems (Princeton, USA) считает, что мощный ветрогенератор должен быть изготовлен и испытан на заводе и отгружен на объект в виде полностью собранного агрегата. Для достижения этой цели разработан полностью сверхпроводниковый генератор мощностью

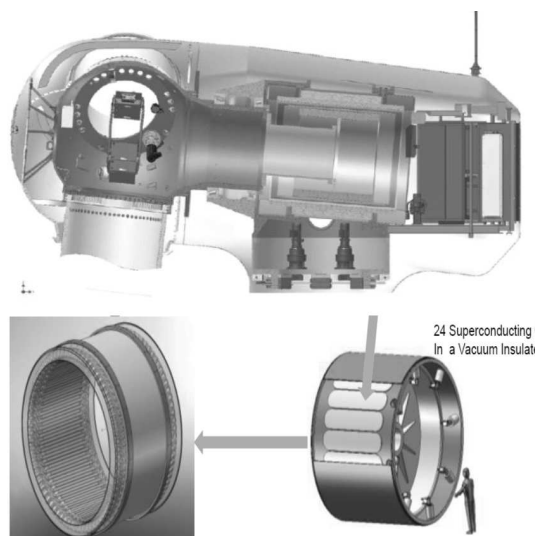


Рис. 2. SeaTitan 10 МВт, разработанный фирмой AMSC

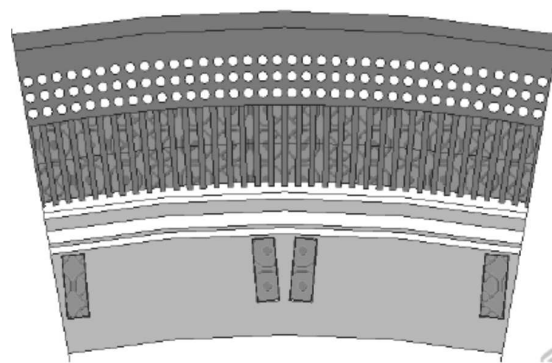


Рис. 3. Поперечное сечение низкотемпературного сверхпроводникового генератора 10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$ , разработанного General Electric

10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$  с применением для обмоток ротора и статора ВТСП, использован круглый кабель коммерчески доступного провода  $\text{MgB}_2$ . Катушки охлаждаются с помощью готовых криокулеров. Ожидается, что генератор будет иметь диаметр менее 5 м, осевую длину не более 2 м, вес около 52 т [8].

В рамках выполнения европейского проекта INNWIND сверхпроводниковых ветрогенераторов мощностью 10–20 МВт в [9,10] сравниваются двенадцать различных топологий генераторов по сочетанию ферромагнитных и воздушных систем статора и ротора. Для создания генератора, превосходящего генераторы с возбуждением от постоянных магнитов, исследован диапазон возбуждения с МДС от 200 до 550 кА, обеспечивающий КПД 98% и касательные напряжения 100 кПа. Установлено, что все варианты могут быть выполнены при этих условиях, однако только четыре из них – при низ-

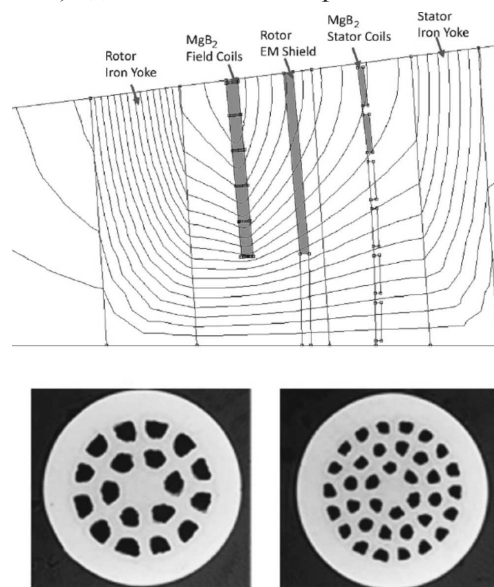


Рис. 4. Расположение обмоток в магнитном поле и поперечное сечение статора и ротора сверхпроводникового безредукторного синхронного генератора 10 МВт с частотой вращения  $10 \text{ мин}^{-1}$  по проекту Kalsi Green Power Systems (Princeton, USA)

кой плотности тока якоря 2 А/мм<sup>2</sup>. Это варианты с ферромагнитным магнитопроводом. Они могут быть реализованы при расчетных магнитных полях низкотемпературной сверхпроводимости 4 К по условию критической инженерной плотности тока коммерческих сверхпроводящих проводов NbTi и Nb<sub>3</sub>Sn. Варианты могут быть реализованы и при ВТСП материалах 20 К. Безредукторный генератор устанавливается перед лопастями турбины с использованием конструкции гондолы king-pin для морских турбин.

Параметры генераторов мощностью 10 МВт и 20 МВт проекта INNWIND представлены в таблице. Генератор 10 МВт имеет частоту вращения 9,7 мин<sup>-1</sup>, линейное напряжение 3,3 кВ и фазный ток 2,2 кА. Число полюсов трехфазного генератора 2p=32. Внешний диаметр статора 7000 мм, активная длина 1050 мм, индукция в зазоре 1,5 Е, линейная нагрузка 100 кА/м. Генератор 20 МВт выполнен на частоту вращения 6,8 мин<sup>-1</sup>, линейное напряжение 5,55 кВ и фазный ток 3,6 кА. Число полюсов увеличено до 64, электромагнитные нагрузки сохранены. Внешний диаметр статора 11000 мм, активная длина 1160 мм.

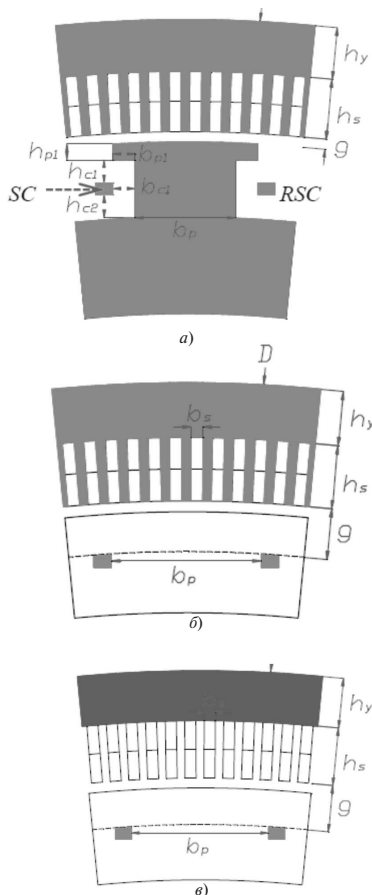


Рис. 5. Топология ветрогенераторов со сверхпроводниковой обмоткой возбуждения: а – ферромагнитный статор–ферромагнитный ротор; б – ферромагнитный статор–неферромагнитный ротор; в – неферромагнитный статор–неферромагнитный ротор

Для ветротурбины концерна Hitachi японская фирма Furukawa Electric совместно с учеными Токийского университета [11] проработала различные проекты сверхпроводникового высокотемпературного ветрогенератора мощностью 10 МВт, 10 мин<sup>-1</sup>, 3,3 кВ с возбуждением на основе ВТСП материалов при 20 К (2G-HTS). Просчитаны варианты для неферромагнитного ротора при числе полюсов, равном 8 и 12. Внешний диаметр не превышает 4 м, а активная длина 1500 мм. При 8-полюсной конструкции вес машины сопоставим с традиционным ветрогенератором мощностью 2–3 МВт, при 8 полюсах уменьшен вес меди и необходимая длина сверхпроводниковой ленты. Отмечено отсутствие высших гармонических в кривых напряжения и тока. Однако генераторы имеют низкое значение индуктивного сопротивления по продольной оси и требуют защиты от коротких замыканий. Общая длина сверхпроводника 570 км.

В варианте многополюсной конструкции 2p=36 ротор выполнен ферромагнитным с явно выраженными полюсами (рис. 6), внешний диаметр составил 7 м, а общая длина сверхпроводника 45 км. После оптимизации на основе 3D-моделирования магнитных полей получен вариант при линейном напряжении 5 кВ и 2p=48 с наружным диаметром 10,5 м и общей длиной сверхпроводника 26,2 км. Такой объем сверхпроводника при современных ценах уже приемлем для коммерческого использования.

В Токийском университете разработан также проект [12] полностью сверхпроводникового высокотемпературного ветрогенератора мощностью 10 МВт, 10 мин<sup>-1</sup>, 3,3 кВ. Статорная сверхпроводящая обмотка выполнена из MgB<sub>2</sub>, а обмотка возбуждения из ВТСП ленты Vi-2223 или YBCO. Для 8-полюсного генератора получен внешний диаметр 3674 мм. Были разработаны три варианта обмоток статора. Результаты анализа FEM показали, что

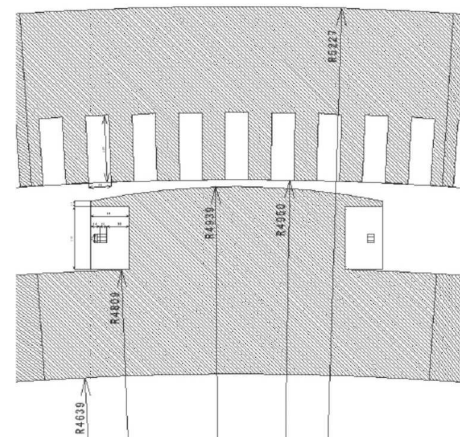


Рис. 6. Размеры поперечного сечения в проекте сверхпроводникового генератора мощностью 10 МВт фирмы Furukawa Electric

выходная мощность 10 МВт достижима при использовании менее чем 500 км лент HTS. Потери переменного тока на холостом ходу могут быть уменьшены до 1,06 кВт. Этот результат показывает, что полностью сверхпроводящий генератор является одним из перспективных кандидатов для дальнейших крупномасштабных ветрогенераторов, но требует дальнейшей оптимизации конструкции и анализа потерь.

Китайскими учеными представлен сверхпроводниковый ветрогенератор 13,2 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$ , 3,3 кВ на основе HTСП материалов (NbTi) [13]. Генератор выполнен шестифазным и имеет 40 полюсов. Внешний диаметр 7340 мм, активная длина 1020 мм. Он примерно на 46% легче генератора с постоянными магнитами, а по весовым показателям сопоставим с аналогичными проектами AMSC, GE и TECNALIA.

Уменьшенный вес упрощает и удешевляет перевозку и установку ветрогенератора. Однако затраты на техническое обслуживание системы охлаждения делают экономически невыгодным применение низкотемпературной сверхпроводимости.

Электромагнитное моделирование полностью сверхпроводникового ветрогенератора на ВТСП материалах мощностью 10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$  приведено в [14]. Обмотка беззубцового статора выполнена из многожильного провода из диборида магния  $\text{MgB}_2$ , обмотка возбуждения – из YBCO. Генератор может быть выполнен на более высокий уровень напряжения 3300 В, внутренний диаметр статора 2662 мм, наружный – 3352 мм, активная длина 1500 мм.

В [15] представлены электромагнитные расчеты сверхпроводникового генератора 10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$ , 5,55 кВ для морской ветротурбины. Поскольку основной целью проектирования генератора являлась

минимизация длины провода 2G HTS, веса и объема генератора, было принято проектное решение низкого КПД системы 92%. Число полюсов шестифазного ( $2p=6$ ) генератора выбрано из условия минимального использования сверхпроводникового провода. С применением двумерного и трехмерного конечно-элементного анализа проведена оптимизация катушек возбуждения из ВТСП материалов Bi-2223 и YBCO. Внешний диаметр статора 3000 мм, активная длина 1574 мм, внешний диаметр ротора 5240 мм. Оптимальный ток возбуждения 360 А определен исходя из критической плотности тока, которая для 2G HTS (0,2' 12,0) мм имеет значение  $167 \text{ А/мм}^2$ . Важным расчетным параметром для сверхпроводниковых ветрогенераторов является напряжение статора.

В [16] представлен корейский проект генератора 10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$ , 6,6 кВ со сверхпроводниковой обмоткой возбуждения из ВТСП материалов. Проект направлен на оптимизацию массы генератора и сверхпроводника. Рассматриваются варианты исполнения обмотки с использованием YBCO и Bi-2223, полученные значения массы провода составляют 71 и 94 т. Размеры генератора приведены в таблице.

В [17] по результатам проектирования сверхпроводниковых генераторов мощностью 2,5 и 8 МВт исследовано влияние на характеристики машины таких параметров, как число полюсов, диаметр ротора и индуктивное сопротивление по продольной оси. У генератора мощностью 2 МВт КПД увеличивается с 92 до 96% при изменении числа полюсов от 6 до 16 и прекращает рост при более чем 20 полюсах, при этом масса генератора значительно уменьшается и почти не меняется в диапазоне числа полюсов 18–28. Длина обмоток возбуждения ВТС минимизируется при  $2p=16-20$ .

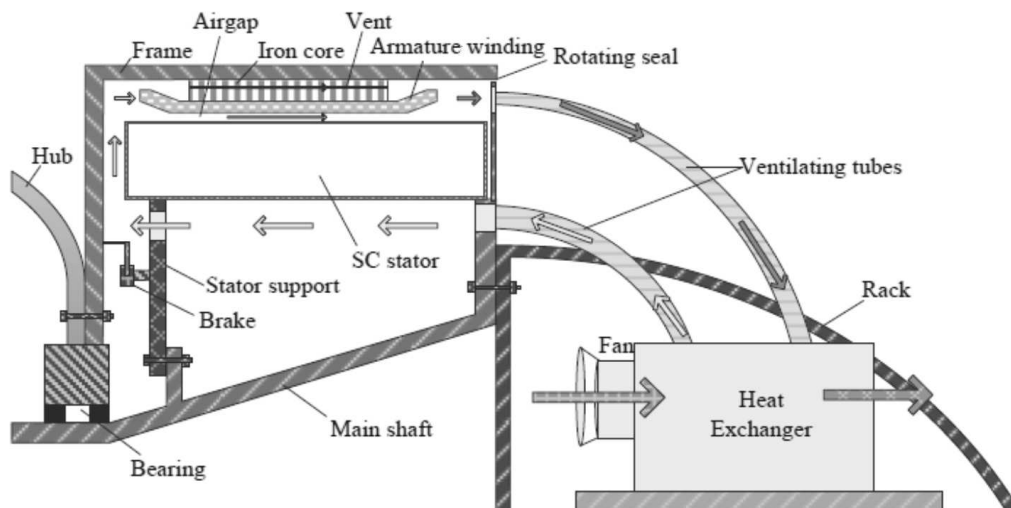


Рис. 7. Конструкция сверхпроводникового ветрогенератора 13,2 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$

Интерес к сверхпроводниковому генератору мощностью 20 МВт проявили французские исследователи [18] (проект ветротурбины EolSupra20).

Синхронный генератор со сверхпроводниковыми обмотками ротора и статора из диборида магния  $MgB_2$  выполнен при частоте вращения  $6,3 \text{ мин}^{-1}$  шестифазным на линейное напряжение 3,3 кВ и фазный ток 3,6 кА. Цель проекта – путем оптимизации добиться минимальной стоимости энергии. Обмотки ротора представляют собой двухслойные катушки, намотанные лентой  $MgB_2$  (0,65' 3,65) мм, работающие при 10 К. Обмотку статора с целью снижения потерь переменного тока предложено изготовить из кабеля с проводниками, подразделенными на 91 нить и работающими при 20 К. Число полюсов трехфазного генератора  $2p=20$ . Внешний диаметр статора 6020 мм, внешний диаметр ротора 5240 мм. Надежность системы повышается установкой двух отдельных криостатов – для статора и ротора. Для снижения веса машины и упрощения криогенной системы статор выполнен беззубцовым. Принятые решения позволяют снизить стоимость гондолы, башни и фундамента и уменьшить стоимость энергии и общий вес турбины. Однако большое число криокулеров, принятое на данном этапе исследования, делает это решение непрактичным. Ожидается, что проблема будет решена вместе с развитием технологии и появлением более мощных и эффективных криокулеров. В будущих работах необходимо также тщательно рассмотреть вопрос о потерях переменного тока.

Наряду с традиционной синхронной машиной для создания сверхпроводникового генератора предложено также применение синхронной машины с когтеобразными полюсами [19], униполярного генератора [20], синхронного генератора с переключаемым магнитным потоком [21].

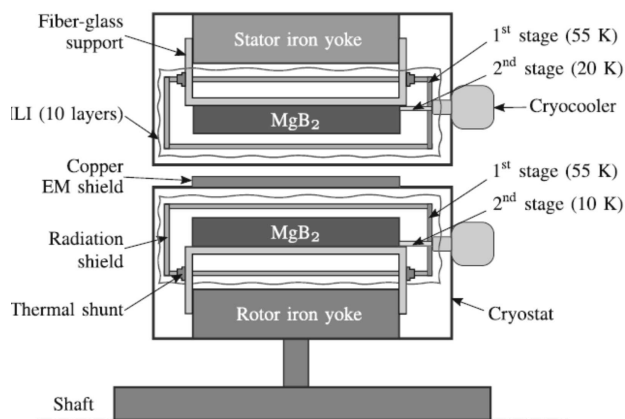


Рис. 8. Синхронный генератор мощностью 20 МВт со сверхпроводящими обмотками ротора и статора из диборида магния  $MgB_2$  (проект EolSupra20)

Сверхпроводниковый ветрогенератор 10 МВт,  $10 \text{ мин}^{-1}$ , 3,3 кВ с когтеобразными полюсами [19] имеет внешний диаметр статора 6,5 м, активную длину 1380 мм, общий вес 184 т. В обмотке возбуждения использован сверхпроводник  $MgB_2$ .

В статье [20] предлагается ветрогенератор униполярного типа мощностью 10 МВт, 6,6 кВ,  $1500 \text{ мин}^{-1}$ , 200 Гц, внешний диаметр статора 2942 мм, ротора 2460 мм, активная длина 1471 мм, воздушный зазор 17 мм. Отмечается более высокая плотность крутящего момента, меньший вес и более высокая эффективность, чем у синхронного генератора.

Концептуальный проект высокотемпературного сверхпроводящего двухстаторного безредукторного ветрогенератора мощностью 10 МВт, 9,6  $\text{мин}^{-1}$ , 4,0 кВ предложен и исследован в [21]. Имея два пространственно независимых статора (для размещения ВТСП обмоток возбуждения (Vi-2223) и медных обмоток якоря), генератор не требует контактных колец и щеток, при этом повышаются надежность и уменьшаются эксплуатационные расходы. Электромагнитные характеристики при холостом ходе, номинальной нагрузке и трехфазном коротком замыкании проанализированы методом конечных элементов. Отмечаются синусоидальность напряжения, низкие значения зубцового момента и пульсации крутящего момента под нагрузкой. Внутренний диаметр внешнего статора 9600 мм, активная длина 800 мм; нагрузки:  $A=113 \text{ кА/м}$ ,  $j=1,77 \text{ А/мм}^2$ ,  $B=1,99 \text{ Т}$ . Удельная мощность в два раза выше, чем у генератора с прямым приводом на постоянных магнитах, и сопоставима с мощностью существующих концептуальных генераторов с прямым приводом на основе ВТСП материала  $MgB_2$ .

Тем не менее в основе конструкции сверхпроводникового ветрогенератора мощностью 10 МВт и выше остается безредукторный синхронный генератор. Рассмотрены различные концептуальные проекты при низко- и высокотемпературной сверхпроводимости, сверхпроводниковой обмотке возбуждения и полностью сверхпроводниковой машине при различном выборе ВТСП материалов. Номинальные данные, геометрические размеры и характеристики генераторов рассмотренных проектов сведены в таблице.

Анализ исследований позволяет сделать следующие выводы:

проектирование сверхпроводникового генератора ведется с учетом из минимизации значений одной из трех величин – стоимости вырабатываемой электроэнергии, массы ветротурбины и полной длины требуемого ВТСП материала. От выбора па-

Проекты сверхпроводниковых ветрогенераторов мощностью 10 МВт и выше

Параметры	[9,10] INNWIND	[8] Kalsi	[11] Fukui	[11] Fukui	[11] Fukui	[11] Fukui	[12] Terao	[13] Wang $m=6$	[14] Liang	[15] Kim	[16] Sung	[7] Fair	[9,10] INNWIND	[18] Hoang $m=6$
Магнито-провод	Fs/Fr	Fs/Fr	Fs/Ar	Fs/Fr	Fs/Fr	Fs/Fr	Fs*/Fr	Fs/Ar	Fs*/Fr	Fs*/Ar	Fs/Ar	Fs/Ar	Fs/Ar	Fs/Fr
$P$ , МВт	10	10	10.	10	10	10	10.	13,2	10	10	10	10	20	20
$N$ , мин <sup>-1</sup>	9,6	10	10	10	10	10	10	9	10	10	10	10	6,8	6,3
$U$ , кВ	3,3	4,5	3,3	5,0	5,0	5,0	3,3	3,3	3,3	5,54	6,6	3,3	3,3	3,3
$I$ , А	2200	1360	1750	1155	1155	1155	1750		1750		875	1750		3600
$D_{op}$ , мм	7000	<5000	3674	7014	7014	10500	3674	7340	3252	3646	5300	4876	11000	6020
$D_i$ , мм	--	4736	2662	6282	6282				2662	1782	4650	4366		5774
$L$ , мм	1050	690	1500	1500	1500	1500	1500	1020	1500	1574	500	1876	1160	1300
$2p$	32	24	8	36	36	48	8	40		6	24	36	64	20
$Z$	384	288	84	324	324	432				108	144	648	768	
$J$ , А/мм <sup>2</sup>	3,5	--	3,0							6,2	251		3,5	
$I_B$ , А	217	1000		160	160					360	100	277	340	
$B$ , Т	3,22	1,7		1,0	1,0				3,42					
$I_k$ , А/мм <sup>2</sup>	340	--	1680							167	251		340	2276
$d$ , мм	9	20		14	14							19	13	
КПД, %	95,5	98,0				97,6				92,0		95-98		96,8
Сверхпроводниковый материал	Cu YBCO 30 К 5,35 км	MgB <sub>2</sub> 20 К MgB <sub>2</sub> 15 К	Cu YBCO 20 К	Cu YBCO 40 К 45 км	Cu YBCO 40 К 26,2 км	Cu YBCO 40 К 26,2 км	MgB <sub>2</sub> 20 К, 270 км YBCO 20 К 275 км	NbTi 4,2 К	MgB <sub>2</sub> YBCO 20 К	2G HTS 22 К 289 км	Cu YBCO 40 К <222км	Cu NbTi 4,2 К	Cu YBCO 30 К 10,54 км	MnB <sub>2</sub> 20 К MnB <sub>2</sub> 10 К

Fs — ферромагнитный статор; Fs\* — ферромагнитный статор беззубцовый; Fr — ферромагнитный ротор; Ar — неферромагнитный ротор

раметра оптимизации зависят размеры и характеристики генератора;

сверхпроводниковый генератор на основе HTСП материалов, несмотря на их низкую стоимость, требует гелиевого криогенного оборудования, что повышает эксплуатационные расходы и снижает надежность оборудования;

основным препятствием на пути коммерческого использования сверхпроводникового генератора на ВТСП материалах является цена необходимого объема сверхпроводника. Так, цена  $MgB_2$  превышает цену  $NiTi$  в 10 раз,  $Bi-2223$  – в 50 раз,  $YBCO$  – в 75 раз;

сравнение цен и допустимых значений плотности тока ВТСП материалов  $MgB_2$  ( $100 \text{ A/mm}^2$ ),  $Bi-2223$  ( $390 \text{ A/mm}^2$ ) и  $YBCO$  ( $480 \text{ A/mm}^2$ ) позволяет им конкурировать при проектировании генератора на температуру 20 К;

предпочтительной является конструкция частично сверхпроводникового генератора, поскольку при полностью сверхпроводниковом генераторе не только значительно возрастает стоимость ВТСП материала, но требуется и более мощная и сложная криогенная система;

высокая стоимость сверхпроводника делает предпочтительной топологию генератора с ферромагнитным магнитопроводом как статора, так и ротора;

существует предел увеличения числа полюсов при заданном диаметре статора, после которого общая стоимость генератора начинает расти, причем чем больше наружный диаметр генератора, тем больше значение этого предела. Другими словами, можно спроектировать генератор с диаметром 6 м, числом полюсов 24 и с диаметром 12 м, числом полюсов 48 практически одинаковой стоимости.

**Заключение.** Для оффшорной ветроэнергетики с единичной мощностью ветротурбины 10 МВт и более основным трендом развития является внедрение безредукторных синхронных сверхпроводниковых ветрогенераторов.

При существующем состоянии технологии производства и цены сверхпроводников перспективным на ближайшее внедрение следует признать синхронный безредукторный сверхпроводниковый ветрогенератор мощностью 10 МВт с обмоткой возбуждения из ВТСП материала ( $MgB_2$ ,  $Bi-2223$  или  $YBCO$ ) топологии «ферромагнитный статор – ферромагнитный ротор» при диаметре статора 7–9 м и числе полюсов 32–40.

Прогресс в технологии производства ВТСП материалов и снижение их цены может коренным образом поменять оптимальную топологию сверх-

проводникового генератора, но предсказать сроки реализации этого прогноза затруднительно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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 04.04.2020).
2. **Ragheb M.** Modern wind generators. NetFiles. Univ. of Illinois at Urbana-Champaign. 2010. 90 p.
3. **Zhu Z., Qu R., Wang J.** Conceptual design of the cryostat for a direct drive superconducting wind generator. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2011, vol. 21, no. 3. DOI: 10.1109/TASC.2011.229032
4. **AMSC.** Sea Titan TM 10 MW Wind Turbine [Электрон. ресурс] <http://www.amsc.com/documents/seatitan-10-mw-wind-turbine-data-shee> (дата обращения 18.03.2020).
5. **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.
6. **Fair R., Stautner W., Douglass M., et al.** Superconductivity for large-scale wind turbines. Appl. Superconductivity Conf., Portland, Oregon October 11th, 2012. DOE report. DOI: 10.2172/1052970
7. **Advance Magnetic Lab** [Электрон. ресурс] <http://www.magnetlab.com>. (дата обращения 29.03.2020).
8. **Swarn S. Kalsi.** Superconducting wind turbine generator employing  $MgB_2$  windings both on rotor and stator. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2014, vol. 24, No. 1. DOI: 10.1109/TASC.2013.2291275.
9. **Liu D., Polinder H., Abrahamsen A.B., and Ferreira J.A.** Potential of Partially Superconducting Generators for Large Direct-Drive Wind Turbines. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017, vol. 27, No. 5, pp. 1-11. DOI: 10.1109/TASC.2017.2707661.
10. **Dong Liu, Henk Polinder, Asger B. Abrahamsen, and Jan A. Ferreira.** Topology Comparison of Superconducting Generators for 10-MW Direct-Drive Wind Turbines: Cost of Energy Based IEEE Transactions on Applied Superconductivity v/27. n 4.
11. **Fukui S., Ogawa J., T. Sato, Tsukamoto O., Kashima N., Nagaya S.** Study of 10 MW-class wind turbine synchronous generators with HTS field windings. – IEEE Trans. on Applied Superconductivity. 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1151–1154.
12. **Terao Y., Sekino M., and Ohsaki H.** Electromagnetic design of 10 MW class fully superconducting wind turbine generators. – IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2012, vol. 22, No. 3, pp. 5201904. DOI: 10.1109/TASC.2011.2177628.
13. **Wang J., Qu R., Tang Y., Liu Y., Zhang B., et al.** Design of a superconducting synchronous generator with LTS field windings for 12 MW offshore direct-drive wind turbines. – IEEE Trans. Ind. Electron. 2016, vol. 63, No. 3, pp. 1618-1628. DOI: 10.1109/TIE.2015.2415758.
14. **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.
15. **Kim J.H., Kim H.M.** Electromagnetic design of 10 MW class superconducting wind turbine using 2G HTS wire. Progress in Superconductivity and Cryogenics. 2013, vol. 15, No. 3, pp. 29–34.
16. **Sung H.-J., Kim G.-H., Kim K., Jung S.-J., et al.** Practical design of a 10 MW superconducting wind power generator considering weight. – IEEE Trans. on Applied Superconductivity. 2013, vol. 23, No. 3. DOI: 10.1109/TASC.2013.2245175.

17. **Maki N.** Design study of high-temperature superconducting generators for wind power systems. 8th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2007). IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 97. 2008. DOI:10.1088/1742-6596/97/1/012155.

18. **Hoang T.-K., Quéval L., Berriaud C., Vido L.** Design of a 20-MW fully superconducting wind turbine generator to minimize the levelized cost of energy. – IEEE Trans. on Applied Superconductivity. 2018, vol. 28, No. 4. DOI: 10.1109/TASC.2018.2810309.

19. **Keysan O., Mueller M.** A modular and cost-effective superconducting generator design for offshore wind turbines institute for energy systems. Superconductor Science and Technology, 2015, vol. 28, No. 3. DOI: 10.1088/0953-2048/28/3/034004.

20. **Jeong J.-S., An D.-k., Hong J.-P., et al.** Design of a 10-MW-class HTS homopolar generator for wind turbines. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4. DOI: 10.1109/TASC.2017.2669140.

21. **Y. Liu, S. Niu, S. L. Ho, W. N. Fu, and T. W. Ching.** Design and analysis of a new HTS double-stator doubly-fed wind generator. – IEEE Trans. Appl. Supercond, 2015, vol. 25, No. 3. DOI: 10.1109/TASC.2014.2366458.

[11.05.2020]

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

*Грозов Андрей Дмитриевич – научный сотрудник ИХС РАН.*

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

*Electrichestvo, 2020, No. 10, pp. 59–67*

*DOI:10.24160/0013-5380-2020-10-59-67*

## Superconducting Wind Generators with Capacities of 10 MW and Larger (a Review of Foreign Publications)

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

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

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

*The overall dimensions and mass of wind power units with capacities larger than 10 MW can be improved and their cost can be decreased by developing and constructing superconducting synchronous generators. The article analyzes foreign conceptual designs of superconducting synchronous generators based on different principles: with the use of high- and low-temperature superconductivity, fully superconducting or only with a superconducting excitation system, and with the use of different materials (MgB<sub>2</sub>, Bi2223, YBCO). A high cost of superconducting materials is the main factor impeding commercial application of superconducting generators. In view of the state of the art in the technology for manufacturing superconductors and their cost, a conclusion is drawn, according to which a synchronous gearless superconducting wind generator with a capacity of 10 MW with the field winding made of a high-temperature superconducting material (MgB<sub>2</sub>, Bi-2223 or YBCO) with the «ferromagnetic stator – ferromagnetic rotor» topology, with the stator diameter equal to 7–9 m, and with the number of poles equal to 32–40 has prospects for its practical use in the nearest future.*

**Key words:** *wind power engineering, synchronous superconducting wind generators, design concepts, factors impeding commercial application, advanced projects*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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 [Electron. Resource] <http://www.osti.gov/bridge> (Data of appeal 04.04.2020).

2. **Ragheb M.** Modern wind generators. NetFiles. Univ. of Illinois at Urbana-Champaign. 2010. 90 p.

3. **Zhu Z., Qu R., Wang J.** Conceptual design of the cryostat for a direct drive superconducting wind generator. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 201, vol. 24, iss. 3. DOI: 10.1109/TASC.2013.229032

4. **AMSC.** Sea Titan TM 10 MW Wind Turbine [Electron. Resource] <http://www.ams.com/documents/seatitan-10-mw-wind-turbine-data-shee> (Data of appeal 18.03.2020).

5. **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.

6. **Fair R., Stautner W., Douglass M., et al.** Superconductivity for large-scale wind turbines. Appl. Superconductivity Conf., Portland, Oregon October 11th, 2012. DOE report. DOI: 10.2172/1052970

7. **Advance Magnetic Lab** [Электрон. ресурс] <http://www.magnetlab.com>. (дата обращения 29.03.2020).

8. **Swarn S. Kalsi.** Superconducting wind turbine generator employing MgB<sub>2</sub> windings both on rotor and stator. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2014, vol. 24, No. 1. DOI: 10.1109/TASC.2013.2291275.

9. **Liu D., Polinder H., Abrahamsen A.B., and Ferreira J.A.** Potential of Partially Superconducting Generators for Large



Direct-Drive Wind Turbines. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017, vol. 27, No. 5, pp. 1–11. DOI: 10.1109/TASC.2017.2707661.

10. **Dong Liu, Henk Polinder, Asger B. Abrahamsen, and Jan A. Ferreira.** Topology Comparison of Superconducting Generators for 10-MW Direct-Drive Wind Turbines: Cost of Energy Based IEEE Transactions on Applied Superconductivity v/27 nT4..

11. **Fukui S., Ogawa J., T. Sato, Tsukamoto O., Kashima N., Nagaya S.** Study of 10 MW-class wind turbine synchronous generators with HTS field windings. – IEEE Trans. on Applied Superconductivity. 2011, vol. 21, No. 3, pp. 1151–1154.

12. **Terao Y., Sekino M., and Ohsaki H.** Electromagnetic design of 10 MW class fully superconducting wind turbine generators. – IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2012, vol. 22, No. 3, pp. 5201904. DOI:10.1109/TASC.2011.2177628.

13. **Wang J., Qu R., Tang Y., Liu Y., Zhang B., et al.** Design of a superconducting synchronous generator with LTS field windings for 12 MW offshore direct-drive wind turbines. – IEEE Trans. Ind. Electron. 2016, vol. 63, No. 3, pp. 1618-1628. DOI: 10.1109/TIE.2015.2415758.

14. **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.

15. **Kim J.H., Kim H.M.** Electromagnetic design of 10 MW class superconducting wind turbine using 2G HTS wire. Progress in Superconductivity and Cryogenics. 2013, vol. 15, No. 3, pp. 29–34.

16. **Sung H.-J., Kim G.-H., Kim K., Jung S.-J., et al.** Practical design of a 10 MW superconducting wind power generator considering weight. – IEEE Trans. on Applied Superconductivity. 2013, vol. 23, No. 3. DOI: 10.1109/TASC.2013.2245175.

17. **Maki N.** Design study of high-temperature superconducting generators for wind power systems. 8th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2007). IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 97. 2008. DOI:10.1088/1742-6596/97/1/012155.

18. **Hoang T.-K., Quéval L., Berriaud C., Vido L.** Design of a 20-MW fully superconducting wind turbine generator to minimize the levelized cost of energy. – IEEE Trans. on Applied Superconductivity. 2018, vol. 28, No. 4. DOI: 10.1109/TASC.2018.2810309.

19. **Keysan O., Mueller M.** A modular and cost-effective superconducting generator design for offshore wind turbines institute for energy systems. Superconductor Science and Technology, 2015, vol. 28, No. 3. DOI: 10.1088/0953-2048/28/3/034004.

20. **Jeong J.-S., An D.-k., Hong J.-P., et al.** Design of a 10-MW-class HTS homopolar generator for wind turbines. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2017, vol. 27, No. 4. DOI: 10.1109/TASC.2017.2669140.

21. **Y. Liu, S. Niu, S. L. Ho, W. N. Fu, and T. W. Ching.** Design and analysis of a new HTS double-stator doubly-fed wind generator. – IEEE Trans. Appl. Supercond, 2015, vol. 25, No. 3. DOI: 10.1109/TASC.2014.2366458.

[11.05.2020]