

Высокотемпературный сверхпроводниковый генератор мощностью 1 МВ·А для ветроэнергетических установок

КОВАЛЕВ К.Л., ПОЛТАВЕЦ В.Н., КОЛЧАНОВА И.П., ИЛЬЯСОВ Р.И., ФИРСОВ В.П.

Ведущие зарубежные и российские научные центры ведут работы по созданию ветроэнергетических установок (ВЭУ) на основе эффекта сверхпроводимости. Генераторы на основе высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов характеризуются большим значением удельной мощности, высоким КПД, более компактны и обладают повышенным ресурсом. Кроме того, применение ветрогенератора с волновым мультипликатором позволяет увеличить частоту вращения генератора и дополнительно снизить массу поворотной части ветроэнергетической установки. Приведены результаты теоретического расчета и численного моделирования, дано описание конструкции и показаны результаты испытаний первого в России сверхпроводникового синхронного генератора мощностью 1 МВ·А с обмотками возбуждения на основе ВТСП ленты 2-го поколения для ВЭУ.

Ключевые слова: сверхпроводниковый генератор, ветроэнергетическая установка, сверхпроводниковые обмотки возбуждения, YBCO, криостат, опытный образец

Ветроэнергетика — одно из наиболее перспективных направлений развития нетрадиционных источников энергии. По сведениям Global Wind Energy (GWEC), совокупный объем установленных мощностей электростанций, использующих энергию ветра, на конец 2016 г. достиг 486,7 ГВт. Прирост мощностей ветроэнергетических станций (ВЭС) только в 2016 г. в мире составил 54,6 ГВт, половина приходится на Китай. В США было введено 8,2 ГВт, в ЕС — 12,5 ГВт [1].

Наиболее стремительно сегмент ветровой энергетики растет в развивающихся странах. Индия установила национальный рекорд, введя в 2016 г. 3,6 ГВт мощностей за счет ВЭС, заняв четвертое место в мире по ветроэнергетике с суммарной мощностью ВЭС 28,7 ГВт. В Бразилии (пятый по размерам показатель прироста в мире) было введено 2 ГВт, а установленная мощность ветроэнергетики по итогам года превысила 10 ГВт [1].

В России на конец 2016 г. совокупный объем установленных мощностей с учетом Республики Крым составил всего 105,36 МВт [2]. Ввиду того, что среднегодовая скорость ветра в большинстве регионов России не превышает 5 м/с, ветроэнергетика эффективна в ограниченных регионах, в основном на побережье омывающих границы России морей и океанов, а также в Крыму и на Северном Кавказе [3].

Развитие ветроэнергетики в России происходит весьма сдержанно также из-за отсутствия необходимой правовой базы и отсутствия производства комплектующих устройств. В мае 2013 г. Правительство России подписало пакет мер поддержки

развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) (Постановление Правительства от 28.05.2013 № 449 и распоряжение Правительства от 28.05.2013 №861-р) [4, 5]. Основная цель этих документов — создание отечественной промышленности, в том числе по производству ветрогенераторов и их компонентов.

Инновационные технологии для совершенствования ветроэнергетических установок. Особое значение приобретает вопрос повышения эффективности электроэнергетического оборудования ВЭУ за счет увеличения единичных мощностей ветрогенераторов до 10 МВ·А, что неизбежно ведет к увеличению их массогабаритных характеристик и стоимости. Решить проблему снижения массы поворотной части ВЭУ можно с внедрением высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) технологий, которые могут использоваться как в генерирующих устройствах ВЭУ, так и в соединительных кабелях.

Существуют две концепции сверхпроводникового ветрогенератора: сверхпроводниковыми являются обмотки возбуждения (ОВ) ротора; сверхпроводниковыми являются обмотки ротора и статора. Применение сверхпроводящих обмоток позволяет снизить массу (в несколько раз) при сохранении (или даже увеличении) его выходной мощности, а также получить более высокий КПД по сравнению с генераторами традиционного исполнения [6].

Для изготовления сверхпроводящих обмоток используют следующие ВТСП ленты [7]:

1-го поколения (ВТСП 1G) – соединения на основе диборида магния MgB_2 и висмутовой керамики в серебряной матрице BSCCO, работающие при температурах жидкого водорода (20 К) и неона (27 К);

2-го поколения (ВТСП 2G) – соединения на основе иттриевой керамики YBCO, работающие при температуре жидкого азота (77 К).

Основное преимущество лент ВТСП 2G заключается в их высокой токонесущей способности в больших магнитных полях при температуре жидкого азота. Ограничение критического тока в магнитном поле для BSCCO имеет фундаментальные причины (высокая анизотропия электрофизических свойств и связанная с этим малая сила пиннинга вихрей магнитного потока). Сверхпроводники на основе MgB_2 отличает слабая анизотропия сверхпроводящих свойств и низкая стоимость в сравнении как с BSCCO, так и с YBCO ВТСП, однако их применение ограничено температурой охлаждения – не выше водородного уровня (20 К) [7].

Большинство разработок зарубежных ВТСП электрических машин опирается на концепцию использования в индукторе машины композитных ленточных ВТСП проводов на основе BSCCO поколения 1G. Ниже в табл. 1 приведен список зарубежных проектов опытных образцов электродвигателей и генераторов на основе ВТСП, составленный по материалам доклада В. Пруссейта (W. Prusseit «Supraleiterindustrie in Deutschland – status und perspektiven»), представленного на семинаре «Будущее и инновации в энергетическом оборудо-

вании с применением ВТСП» («Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatur-Supraleitern») и российских разработок опытных образцов двигателей и генераторов на основе ВТСП [8].

Опыт проектирования ВТСП электрических машин показывает, что в машинах со сверхпроводящей обмоткой возбуждения по сравнению с машинами традиционного исполнения удастся уменьшить массу примерно в 3 раза, активную длину машины на 60–70%, внешний диаметр ротора на 10–20%, общую длину ротора примерно на 50% при повышении КПД на 0,4–1%.

Концепция разработки СПСГ. Большинство производителей ВЭУ разрабатывают ветрогенераторы мощностью от 1 до 8 МВт в основном на базе среднескоростных (60–600 мин^{-1}) генераторов с мультипликатором и низкоскоростных (8–20 мин^{-1}) генераторов с прямым приводом [9]. Ветрогенераторы с прямым приводом из-за больших габаритов составляют небольшую долю рынка [9]. Тем не менее, они являются перспективным решением, поскольку показывают более высокую надежность и меньшие затраты на техническое обслуживание.

Конструктивное исполнение ветрогенератора с мультипликатором позволяет снизить габариты ветрогенератора, а соответственно, и его стоимость. Недостатком является сложность конструкции мультипликатора, которая требует тщательного обслуживания и является причиной наиболее частых отказов.

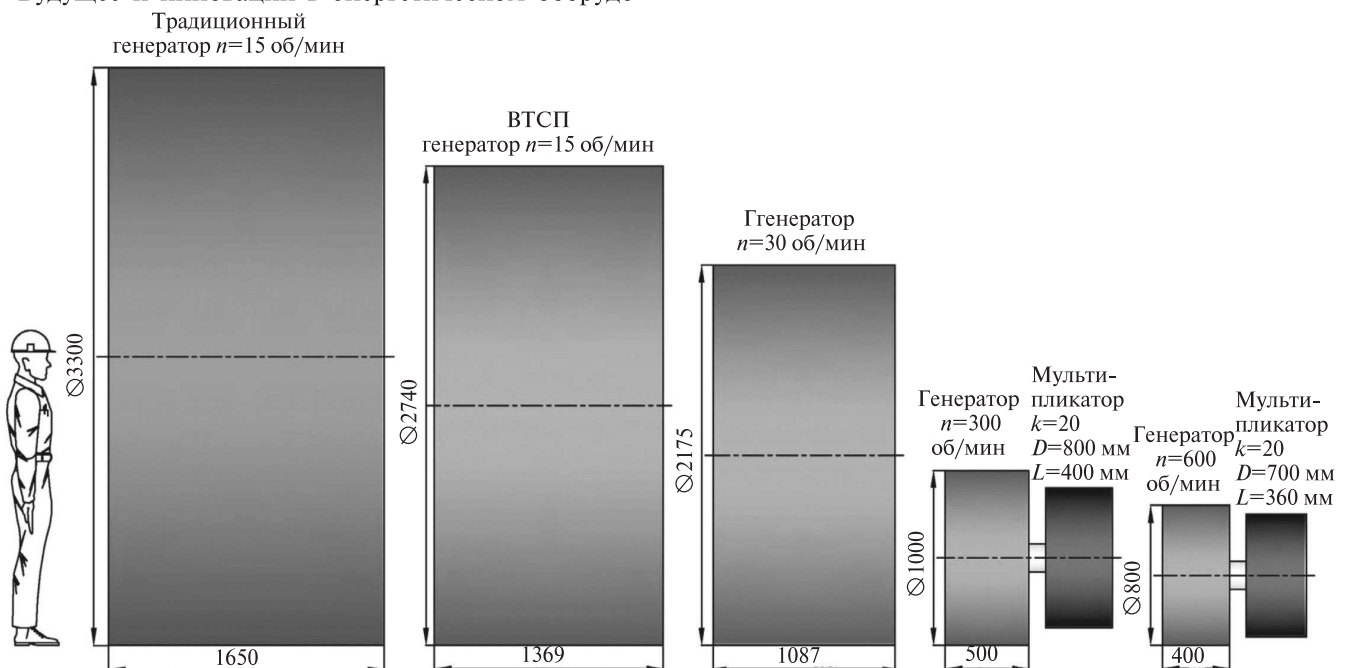


Рис. 1. Сравнительные размеры активных зон мегаваттных синхронных генераторов: *a* – традиционный генератор с электромагнитным возбуждением; *b* – генераторы с СП обмоткой возбуждения (ОВ); *c* – генераторы с обмоткой возбуждения на основе ВТСП 2G и мультипликатором

Таблица 1

Изготовитель	Страна	Год	Тип изделия	Мощность, МВ А	Число оборотов в мин	ВТСП материалы
AMSC	США	2001	Электродвигатель	3,8	1800	BSCCO
		2003	Судовой электродвигатель	5	230	BSCCO
		2007	Судовой электродвигатель	36,5	120	BSCCO
AMSC/TECO	США	2012	Ветрогенератор	10	11	–
Couvertteam/ Zenergy/EON	Великобритания	2009	Гидрогенератор	1,25	214	BSCCO
Couvertteam/ Zenergy	Великобритания	2010	Ветрогенератор	8	12	BSCCO
DTU/Vestas	Дания	2010	Ветрогенератор	–	–	–
General Electric	США	2003	Генератор	1,5	–	BSCCO
		–	Униполярный генератор	36	3600	BSCCO
		–	Гребной электродвигатель	36	120	BSCCO
		–	Генератор	4	7000	BSCCO
		–	Гребной электродвигатель	4	132	BSCCO
KERI/Doosan	Корея	2007	Электродвигатель	0,08	–	BSCCO
		2011	Электродвигатель	5	–	BSCCO
Oswald	Германия	2002	Моментный электродвигатель	0,2	–	массивные YBCO
		–	Электродвигатель	0,5	–	массивные YBCO
Siemens	Германия	2002	Генератор	0,4	1500	BSCCO
		2005	Генератор	4	3600	BSCCO
		2008	Судовой электродвигатель	4	120	BSCCO
Sumitomo Electric Industries	Япония	2007	Судовой электродвигатель	0,365	250	BSCCO
		–	Двигатель для автомобиля	0,31	3100	BSCCO
MAI/Oswald	Россия	2005	Двигатель	0,1	–	массивные YBCO
MAI/НИИЭМ		2009	Двигатель	0,15	6000	массивные YBCO
		2015	Двигатель для транспорта	0,2	1500	YBCO
		2015	Ветрогенератор	1	600	YBCO
		2015	Генератор	0,96	6000	YBCO

На рис. 1 для сравнения показаны размеры активных зон ветрогенераторов мощностью 1 МВА различного конструктивного исполнения [10]. Из рис. 1,б видно, что применение ВТСП позволяет снизить габаритные размеры, а соответственно, и массу генератора. Увеличение номинальной частоты вращения сверхпроводникового генератора в два раза (с 15 до 30 мин⁻¹) дополнительно уменьшает объем активной зоны. Более эффективным является использование ВТСП генератора в паре с мультипликатором (рис. 1,в) .

На основании анализа конструктивных решений ВТСП электрических машин, включая оценку способов охлаждения ВТСП обмоток, была выбрана конструкция синхронного генератора с ОВ ротора на основе ленты поколения 2G и мультипликатором на основе волновой передачи с промежуточными телами качения.

Статор генератора выполняется по классической схеме с медными обмотками и водяным охлаждением. Ротор представляет собой явнополюсную конструкцию с обмотками возбуждения из ВТСП

2G ленты. Обмотка возбуждения ротора, размещенная во вращающемся криостате, охлаждается жидким азотом. Для поддержания рабочей температуры СПОВ ротора на уровне 65–75К применяется замкнутая система охлаждения с использованием цикла турбо-Брайтона.

Учитывая особенности работы с ВТСП проводниками (ограничение радиуса изгиба ленты, отсутствие возможности гнуть на ребро, низкая механическая прочность), наиболее приемлемой конструкцией для создания магнитной системы проектируемого СПСГ были выбраны рейстрекковые катушки. Такая конструкция является модульной, каждый отдельный модуль крепится на магнитопроводе.

Для подачи тока в СПОВ может быть использован щеточно-контактный узел или бесщеточный возбудитель.

Расчет основных параметров СПСГ-1000. Для принятой за основу концепции создания ветрогенератора мощностью 1 МВА были проведены расчетные исследования параметров СПСГ, необходимые для разработки конструкции.

Одним из факторов, влияющих на габаритные размеры ветрогенератора, является частота вращения ротора. Из представленных на рис. 2 графиков зависимостей диаметра расточки статора ветрогенератора и механического момента от частоты вращения ротора видно, что при низкой частоте вращения ротора (до 50 мин⁻¹) диаметр расточки генератора мегаваттной мощности может составлять несколько метров [10]. Единственным способом значительного снижения габаритных размеров ветрогенератора является использование повышающего редуктора—мультипликатора.

Анализ механических передач, преобразующих вращательное движение винта ветрогенератора во

вращение ротора генератора, показал, что наилучшими массогабаритными показателями и высоким КПД обладают мультипликаторы на основе волновой передачи с промежуточными телами качения [11].

При передаточном числе мультипликатора, равном 40, и номинальной частоте вращения мегаваттного ветрогенератора 600 мин⁻¹ диаметр расточки генератора составил 0,8 м.

Конструктивный коэффициент относительной длины полюса $\lambda = 0,5$ выбирался исходя из ограничения внешнего диаметра ярма якоря до 1 м. Это ограничение связано с требованием изготовить пакет магнитопровода без сегментирования, обеспечив таким образом простоту сборки и надежность конструкции. Воздушный зазор, включающий вращающийся криостат, составил 10 мм.

Выбор уровня напряжения определялся мощностью проектируемого генератора, классом и толщиной используемой электроизоляции и параметрами потребителя. Сравнительно низкая частота вращения ротора накладывает ограничение на значение генерируемого напряжения. Компенсирование недостатка ЭДС в низкооборотном генераторе значительным увеличением числа витков нецелесообразно в связи с квадратичной зависимостью индуктивного сопротивления от числа витков в обмотке якоря. С учетом вышеизложенного было выбрано номинальное фазное напряжение $U_{\phi} = 690$ В.

Число пар полюсов выбиралось с учетом целесообразности получения на выходе стандартных 50 Гц при номинальной частоте вращения. Более высокая электрическая частота приводит к росту магнитных потерь в сердечнике статора и снижению КПД.

Использование в составе индуктора обмоток из ВТСП 2G ленты позволяет многократно увеличить МДС обмоток возбуждения по сравнению с медными обмотками, увеличить магнитную индукцию в зазоре и, следовательно, мощность электрической машины, исключая при этом электрические потери в ОВ.

Основными в СП генераторе являются магнитные потери в сердечнике статора, для снижения которых необходимо уменьшить индукцию в зубцах и ярме, увеличив толщину зубцов и высоту ярма. Задача увеличения высоты ярма не представляет сложности, в то время как увеличение толщины зубцов возможно либо за счет уменьшения ширины паза, приводящего к повышению плотности тока и электрических потерь, либо за счет увеличения диаметра расточки, что приводит к увеличению основного габаритного размера и массы. Для

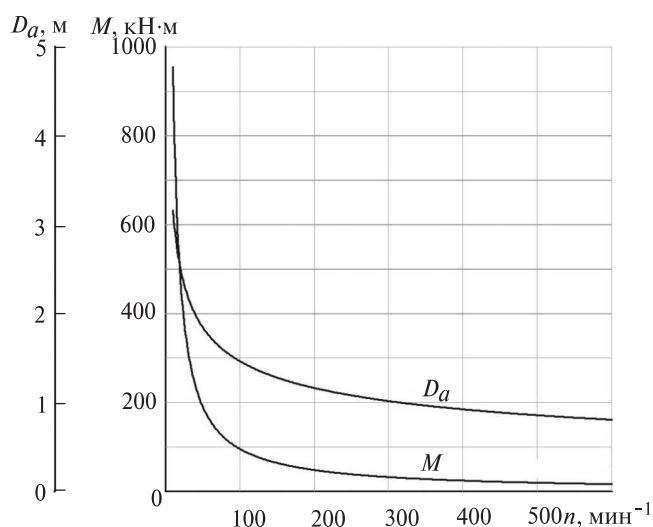


Рис. 2. Механическая характеристика и зависимость диаметра расточки якоря от номинальной частоты вращения

сохранения площади паза целесообразно увеличить его глубину. Серии численных расчетов показали возможность увеличения относительной глубины открытого прямоугольного паза до пяти.

Для снижения электрических потерь в обмотке якоря площадь сечения обмотки была выбрана такой, чтобы номинальная плотность тока не превышала 6 А/мм^2 .

Параметры ротора выбирались в процессе расчета из соображений получения максимально возможного значения магнитного потока возбуждения с учетом ограничений, накладываемых техническими характеристиками ВТСП 2G ленты и магнитными свойствами электротехнической стали.

Поскольку ток возбуждения в ВТСП ленте ограничен критическим значением (при соответствующей температуре), магнитную индукцию можно повысить лишь путем увеличения числа витков, т.е. площади поперечного сечения обмотки. Кроме того, критическое значение плотности тока в ВТСП 2G ленте существенно зависит от внешнего магнитного поля, что необходимо учитывать при расчете и проектировании ОВ.

Определение оптимальных размеров ОВ ротора на основе ВТСП 2G было проведено с учетом распределения магнитного поля обмотки возбуждения при различных соотношениях толщины ОВ и полуширины полюса. Анализ численного расчета показал, что оптимальное соотношение толщины ОВ и полуширины полюсного наконечника составляет 1/5 (20%). В данном случае магнитный поток в магнитопроводе полюса равномерен и не приводит к перенасыщению железа.

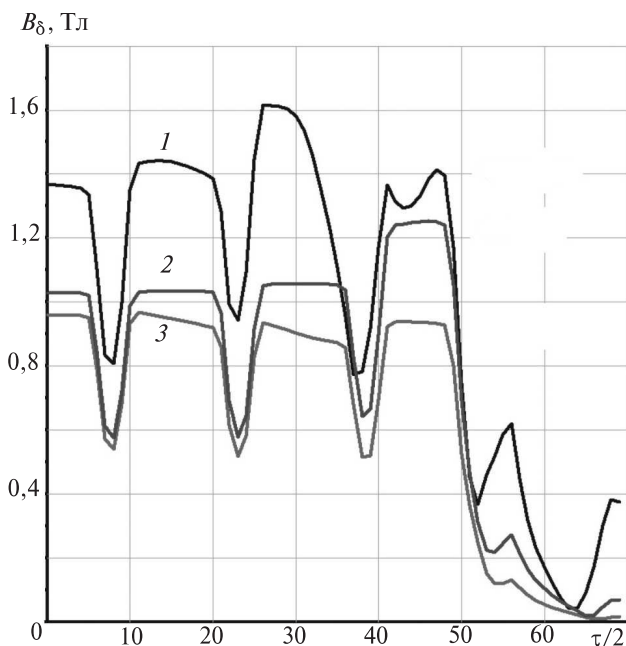


Рис. 3. Распределение индукции в зазоре на половине полюсного деления при различных соотношениях толщины ОВ и полуширины полюса: 1 — ОВ (20%); 2 — ОВ (4%); 3 — ОВ (92%)

На рис. 3 показан график распределения магнитной индукции в зазоре при различных соотношениях толщины ОВ и полуширины полюса. Наличие пиков на графике связано с зубцовыми гармониками.

Другим важным параметром, влияющим на магнитный поток, значение и форму ЭДС, является расчетный коэффициент полюсного перекрытия α , который согласно рекомендациям выбирается в диапазоне $0,68 \div 0,73$ [12]. В результате серии численно-аналитических расчетов оптимум коэффициента полюсного перекрытия составил $\alpha = 0,72$. С целью повышения ЭДС и сохранения допустимой несинусоидальности (согласно ГОСТ 13109-97) было выбрано значение $\alpha = 0,77$, вносящее дополнительный вклад в 20 В выходного фазного напряжения.

На рис. 4 показано распределение индукции в рабочем зазоре по полюсному делению. Видно, что действующее значение магнитной индукции лежит в области примерно 1 Тл, что выше значения магнитной индукции 0,6 Тл. Таким образом, применение в ОВ ВТСП 2G лент позволяет при сохранении возможности регулирования выходного напряжения ветрогенератора повысить мощность в 2 раза.

На рис. 5 показано влияние тока возбуждения на выходные параметры ветрогенератора. Из рисунка видно, что заданное значение выходного фазного напряжения $U_{\phi} = 690 \text{ В}$ при номинальном токе якоря может быть достигнуто только при токе возбуждения более 40 А. Нелинейность роста вы-

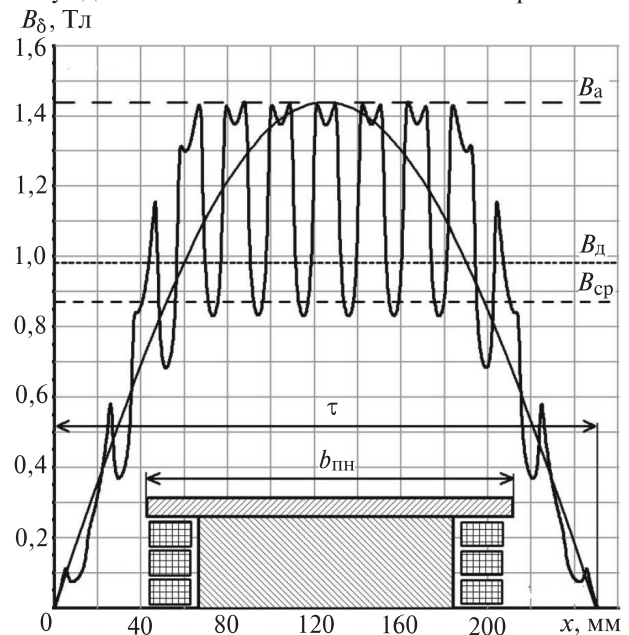


Рис. 4. График распределения индукции основного магнитного потока в зазоре на полюсном делении: B_a , $B_{ср}$, $B_{д}$ — амплитудное, среднее и действующее значения нормальной составляющей индукции; $b_{пн}$ — ширина полюса; τ — полюсное деление; $\alpha = b_{пн}/\tau = 0,77$; $I_{об} = 40 \text{ А}$

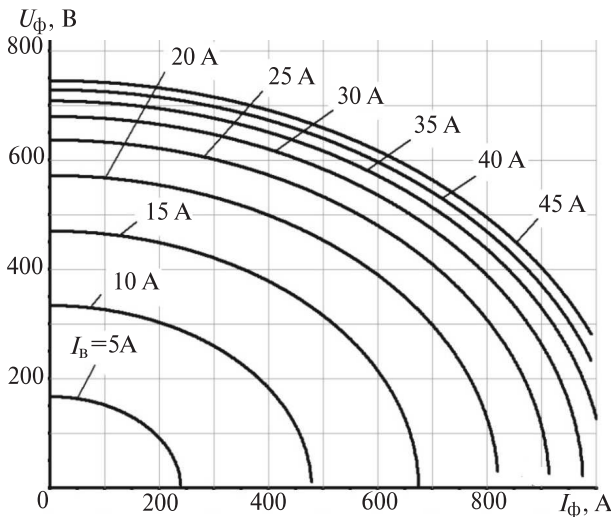


Рис. 5. Семейство внешних характеристик синхронного генератора 1 МВА для различных значений тока в обмотке возбуждения ($w_{OB} = 400$)

ходного напряжения с увеличением тока возбуждения связана с насыщением магнитопровода генератора.

Ниже представлены основные параметры созданного ВТСП ветрогенератора мощностью 1 МВА:

номинальная мощность P_H , кВА	1000
номинальное напряжение U_L/U_ϕ , В	1195/690
номинальная частота f , Гц	50
число полюсов $2p$, шт.	10
число зубцов z_s , шт.	120
число фаз m_ϕ , шт.	3
эффективных витков на фазу w_a , шт.	40
фазный ток I_ϕ , А	500
номинальная плотность тока J_ϕ , А/мм ²	5,8
диаметр расточки статора D_a , мм	800
активная длина генератора L_a , мм	400
момент на валу M_1 , кНм	16
номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi$, отн. ед.	0,99
КПД (без учета затрат на охлаждение) η , %	98,6

Параметры ротора и ВТСП обмотки возбуждения

ширина полюса b_m , мм	148
высота обмотки возбуждения h_m , мм	31,5
толщина обмотки возбуждения b_{OB} , мм	17
размеры ВТСП провода $a \times b$, мм \times мм	4,1 \times 0,15
число катушек по высоте одного полюса $n_{сл}$, шт.	6
число витков одной катушки n_{OB} , шт.	66
ток возбуждения номинальный I_{OB} , А	40
полная длина ВТСП провода L_{OB} , км	5,2

Особенности конструкции генератора СПСГ-1000. Опытный образец сверхпроводникового генератора мощностью 1 МВА представляет собой синхронную явнополюсную электрическую машину с ВТСП обмоткой возбуждения на основе ВТСП 2G лент, охлаждаемой жидким азотом. На рис. 6 приведен общий вид СПСГ-1000 с щеточной системой подачи тока в ОВ ротора.

Особенность конструкции — в наличии вращающегося криостата, который предназначен для поддержания рабочей температуры ВТСП обмотки ротора, уменьшения внешних теплопритоков и снижения расхода хладагента.

Статор СПСГ (рис. 7) состоит из магнитопровода, его обмоток и корпуса. Магнитопровод статора набран из листов электротехнической стали 2421 толщиной 0,35 мм, склеенных лаком КО-916. В пазы магнитопровода статора уложена трехфазная двухслойная обмотка, выполненная из прямоугольного медного провода $1,4 \times 8,0$ мм². Корпус статора выполнен сварным из стали 20.

Нарезка пазов магнитопровода выполнена гидроабразивным методом, что позволяет существенно повысить точность изготовления пакета статора. Кроме того, сохранение изоляционного слоя вблизи кромки значительно уменьшает технологический коэффициент, влияющий на значение потерь на вихревые токи.

Медная шина прямоугольного сечения соответствующих размеров в качестве проводника обмотки якоря выбрана исходя из критерия максимального значения коэффициента заполнения паза.

Тепловые расчеты геометрической модели проектируемого генератора показали, что при отсутствии принудительного охлаждения статора превышение температуры обмотки якоря неизбежно. Предполагаемое суммарное тепловыделение в статоре генератора составляет ~20 кВт. В результате была выбрана система охлаждения статора водой через каналы охлаждения в корпусе.

Ротор СПСГ-1000 (рис. 6 и 8) представляет собой явнополюсную конструкцию. Магнитопровод ротора, выполненный из стали 30ХГСА, соединен на торцах болтами с двумя полувалями. На внешней поверхности магнитопровода закреплены 10 полюсов с катушками из ВТСП 2G ленты и полюсными наконечниками из стали 30ХГСА. Между полюсами установлены клинья из стеклотекстолита, которые вместе с полюсными наконечниками образуют цилиндрическую поверхность (рис. 8). На этот цилиндр надевается труба, которая вместе с боковыми кольцами образует криостат для СП обмотки. Труба и кольца изготовлены из немагнитной стали и после сборки ротора свариваются. Боковые кольца с помощью фланцев и уплотнений соединяются с магнитопроводом ротора.

С внешней стороны криостата устанавливается тепловой экран с криогенной теплоизоляцией Cryogel Z, который закреплен на полувалях ротора. Для компенсации тепловых деформаций элементов ротора тепловой экран с одной стороны закреплен подвижно в осевом направлении.

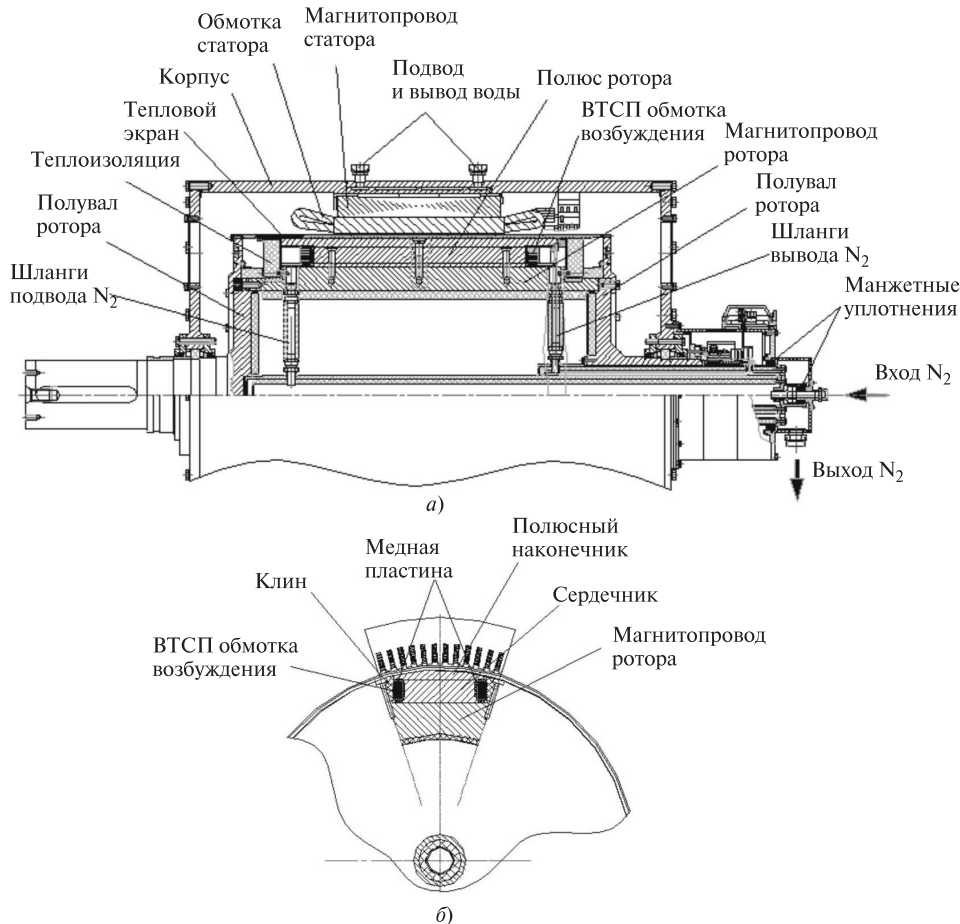


Рис. 6. Общий вид опытного образца СПСГ мощностью 1 МВА с щеточной системой подачи тока в обмотку возбуждения: а — продольный разрез; б — поперечный разрез

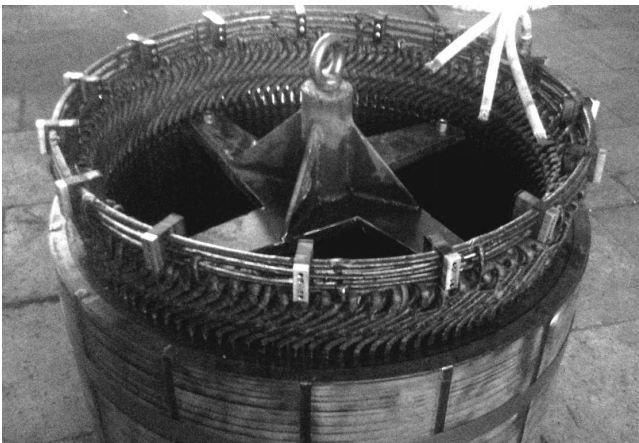


Рис. 7. Статор генератора СПСГ-1000

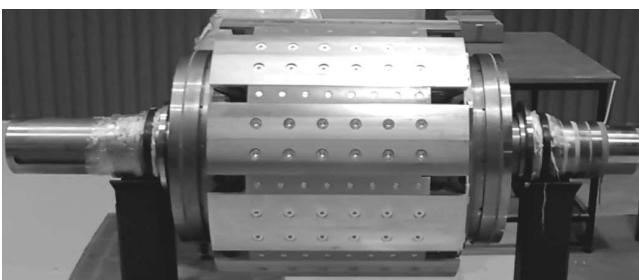


Рис. 8. Ротор СПСГ-1000 в сборе

Катушки из ВТСП 2G ленты охлаждаются жидким азотом, который подается в криостат по центральной трубе и шлангам подвода N_2 . Выход азота из криостата осуществляется по шлангам вывода N_2 и кольцевой трубе. Вход и выход азота из криогенной полости вращающегося ротора герметизируется с помощью манжетных уплотнений. Для уменьшения теплопритоков в криогенную зону боковые кольца криостата, внутренняя поверхность магнитопровода, шланги и центральные трубопроводы азота покрыты слоем пенополиуретана.

Полюса ротора изготавливаются отдельно, а затем устанавливаются на магнитопровод. Обмотка полюсов ротора изготавливается из спаренных отдельных катушек, выполненных ВТСП 2G лентой.

Для подачи тока в сверхпроводниковую ОВ ротора были рассмотрены две принципиальные схемы: щеточно-контактная и бесконтактная с возбудителем и вращающимся выпрямителем. Щеточно-контактная схема обладает простотой конструкции, малыми размерами и возможностью непосредственного измерения тока возбуждения, протекающего через сверхпроводниковые обмотки. К ее недостаткам следует отнести наличие скользящего контакта, приводящее к увеличению потерь на

контактном сопротивлении и ограничениям по максимальному току в ОВ [13].

Преимущество бесконтактной схемы заключается в отсутствии необходимости проведения регламентных работ по контролю текущего состояния щеточного узла и периодической замены щеток и контактных колец. Основной ее недостаток – сложность конструкции и связанные с этим проблемы при устранении возможных неисправностей [13].

На стадии испытаний опытного образца СПСГ-1000 для ввода тока в ОВ ротора использовалась система с щеточным контактом.

ВТСП обмотка возбуждения ротора СПСГ-1000. Изготовление катушек рейстрекковой формы из ВТСП 2G ленты накладывает особые требования к технологии намотки. В отличие от катушек круглой формы рейстрекковые имеют прямолинейные участки с меньшим натягом намотки, на которых ВТСП лента может перемещаться под действием пондеромоторных сил при подаче питания. Эксперименты показали, что перемещения проводников при этом не превышают 0,1 мм и не оказывают влияния на токонесущую способность обмотки [14].

Катушки ОВ ротора опытного образца СПСГ-1000 были изготовлены в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ в соответствии со специально разработанной технологией изготовления полномасштабных катушек из ВТСП 2G ленты.

В результате исследований были приняты следующие решения: изготавливать обмотки без компаундирования; для улучшения охлаждения внутренних витков катушки на полюс из стали применить медный каркас.

Для опытного образца СПСГ-1000 было изготовлено 11 катушек из ВТСП 2G ленты, одна из кото-

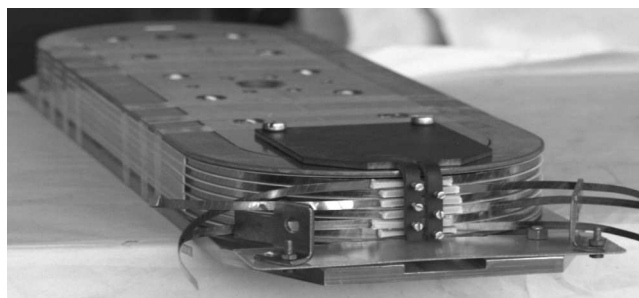


Рис. 9. Полюсная обмотка из ВТСП 2G ленты для СПСГ перед пайкой концов слоев катушек

рых использовалась для тестовых испытаний. Каждая полюсная обмотка состояла из трех двухслойных рейстрекковых катушек (рис. 9), намотанных ВТСП лентой AMSC с размерами поперечного сечения в изоляции $4,93 \times (0,32-0,40)$ мм² на полюс из стали. Разброс значений толщины ВТСП ленты от 0,32 до 0,40 мм обусловил разброс числа витков в обмотках СПСГ (381–393). Двухслойные катушки соединены последовательно. Концы двухслойных катушек соединялись пайкой по мостовой схеме на длине 60 мм; масса обмотки с полюсом составила 50 кг [14].

Технический паспорт на ВТСП обмотку №1 СПСГ-1000:

число катушек в обмотке	3
число слоев в обмотке	6
материал	полиимидная пленка
толщина изоляции ленты на сторону, мкм	76
общее число витков, шт.	387
число паяных соединений в катушке, шт.	1
критический ток обмотки (А) при падении напряжения на обмотке	40,3
1мкВ/см	44,7
10мкВ/см	
сопротивление обмотки, Ом	16,68

Таблица 2

№ обмотки	Критический ток ВТСП ленты I_0 , А (1мкВ/см, 77К, собственное поле)	Критический ток обмотки, А		I_{c1}/I_{0min}	Индуктивность обмотки, мГн	Сопротивление (Ом)/ температура (°С), R/T
		I_{c1} (1 мкВ/см)	I_{c10} (10 мкВ/см)			
1	98-105	40,3	44,7	0,41	420	16,68/21,9
2	103-112	42,4	47,3	0,41	430	16,87/22,2
3	104-112	43,9	48,9	0,42	420	16,46/21,9
4	103-106	39,4	44,0	0,38	430	16,88/20,7
5	103-112	42,3	47,5	0,41	420	16,45/22,0
6	103-108	41,0	45,7	0,40	420	16,60/24,9
7	98-111	41,3	45,9	0,42	420	16,2/21,7
8	103-112	40,1	44,6	0,39	430	16,8/17,7
9	94-112	41,5	46,4	0,44	430	16,67/19,6
10	106-114	43,5	48,5	0,41	420	16,61/22,0
11	94-115	42,3	47,1	0,45	430	17,36/20,6

сопротивление изоляции (ГОм) при $U_{исп}=500$ В	738
температура при измерении сопротивлений, °С	21,9
марка материала сердечника	сталь 3
индуктивность, мГн	420
габариты ВТСП обмотки (длина × ширина), мм	587×187

Все изготовленные обмотки СПСГ-1000 прошли испытания в жидком азоте. Полученные при испытаниях значения критических токов для ВТСП обмоток генератора при напряжениях, соответствующих критерию 1 и 10 мкВ/см, сведены в табл. 2 [14]. Там же представлены значения максимальной индуктивности и активного сопротивления обмотки.

Значение критического тока обмоток СПСГ находилось в интервале 39,4÷43,9 и 44,0÷48,9 А соответственно при падении напряжения на обмотке в 1 и 10 мкВ/см.

Криогенная система охлаждения ротора СПСГ-1000. Ресурс непрерывной работы СПСГ в составе ВЭУ составляет примерно 10000 ч. Для поддержания рабочей температуры СПОВ ротора на уровне 65–75 К необходимо использовать замкнутую систему криообеспечения. С этой целью в Московском авиационном институте была разработана и изготовлена автономная система криообеспечения СКР-001 холодопроизводительностью 2,5 кВт с использованием цикла турбо-Брайтона. Данный тип криосистем обеспечивает большой межремонтный интервал (свыше 30000 ч) при высоком КПД. На рис. 10 представлен специально разработанный и изготовленный для СКР-001 криорефрижератор КР 001 [15].



Рис. 10. Общий вид криорефрижератора КР 001 с холодопроизводительностью до 2,5 кВт

Особенности конструкции криорефрижератора [15]: рабочее тело в газовом контуре — неон; турбокомпрессоры и турбодетандер — с газодинамическими подшипниками при 40000÷55000 мин⁻¹;

охлаждение рабочего тела (неона) после компрессии происходит в компактных пластинчато-ребристых концевых теплообменниках с помощью антифриза, а охлаждение антифриза — воздухом с помощью вентиляторов в теплообменном аппарате;

циркуляция жидкого азота в замкнутом контуре достигается оригинальным шнекоцентрибежным погружным криогенным насосом АКН-017 с номинальным значением массового расхода жидкого азота 170 г/с.

Схема криорефрижератора КР001 представлена на рис. 11 [15].

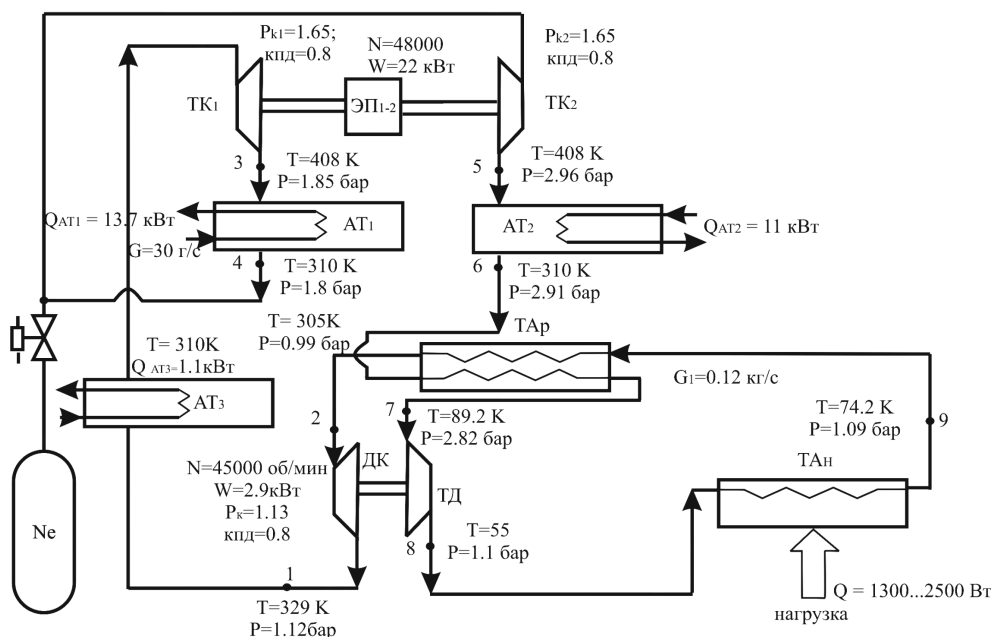


Рис. 11. Схема криорефрижератора КР-001 с холодопроизводительностью 2,5 кВт

Использование радиальных турбомашин на газодинамических подшипниках позволяет при малых габаритах обеспечивать надежную и длительную работу криорефрижератора в сочетании с высокой термодинамической эффективностью.

Экспериментальные исследования СПСГ-1000.

На рис. 12 представлен опытный образец СПСГ-1000 во время проведения стендовых испытаний. При динамических испытаниях генератор напрямую подключался к приводному двигателю постоянного тока мощностью 2 МВт.



Рис. 12. Опытный образец ветрогенератора СПСГ-1000 (слева) с приводным двигателем (справа) на испытательном стенде

На рис. 13 представлены основные характеристики опытного образца СПСГ-1000, полученные в ходе испытаний при номинальной частоте вращения 600 мин⁻¹.

Характеристика холостого хода (рис. 13,а) определялась при условии контроля обмотки возбуждения в состоянии сверхпроводимости. Значение тока возбуждения генератора в режиме холостого хода при номинальном значении фазного напряжения 690 В составило 24 А. Остаточное намагничивание генератора по экстраполированной характеристике равно 18 В. В целом полученная экспериментально характеристика холостого хода соответствует расчетной.

Внешняя характеристика СПСГ (рис. 13,б) была получена для активно-индуктивной нагрузки. Практически линейная функция роста мощности показывает возможность ее полуторакратного увеличения по току якоря. Регулировочная характеристика (рис. 13,в) определялась при $U_{\phi} = 690$ В.

Испытания опытного образца СПСГ-1000 подтвердили правильность расчетных методик и принятых конструктивных решений, которые могут быть использованы при создании сверхпроводниковых ветрогенераторов мощностью до 5 МВА и более.

Работа по созданию опытного образца сверхпроводникового синхронного генератора (СПСГ) мощностью 1 МВА проводилась в рамках проекта государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Инновационная энергетика/Сверхпроводниковая индустрия».

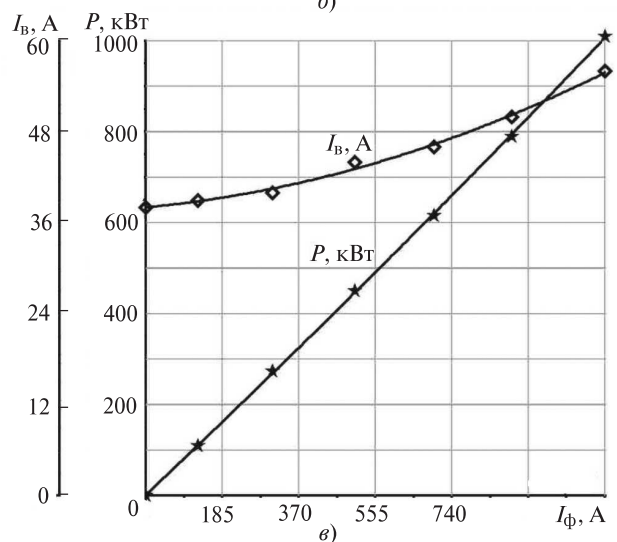
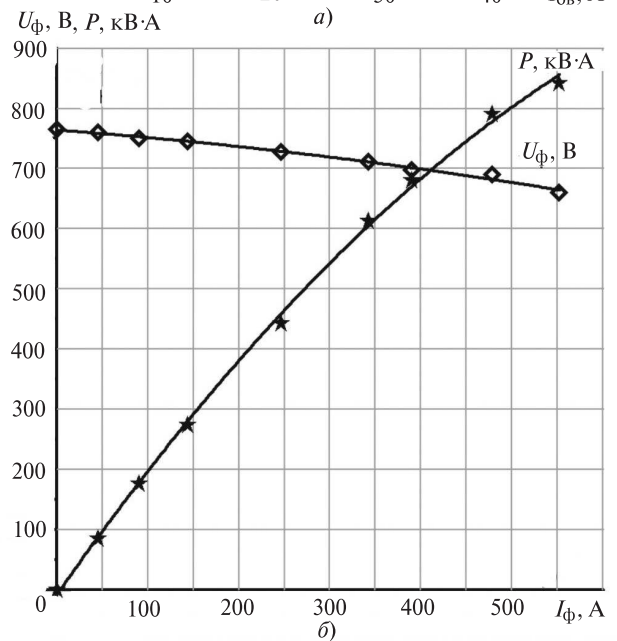
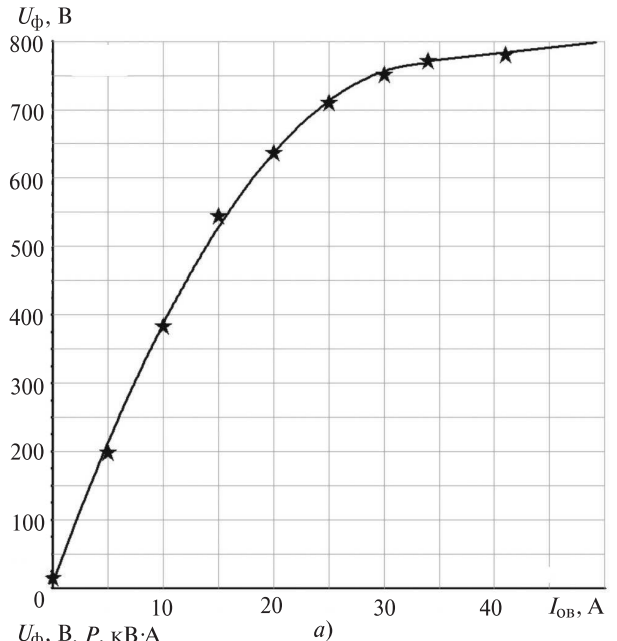


Рис. 13. Основные характеристики СПСГ-1000: а – характеристика холостого хода; б – внешняя характеристика; в – регулировочная характеристика

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Итоги** развития мировой ветроэнергетики в 2016 г. Альтернативная энергия. <http://altenergiya.ru/novosti/itogi-razvitiya-mirovoj-vetroenergetiki-v-2016.html>
2. **Список** ветряных электростанций России: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
3. **Скорости** ветра в России и строительство ветряных электростанций (ВЭУ). Новая Генерация: <http://www.manbw.ru/analytics/windrus.html>
4. **Постановление** Правительства России от 28.05.2013 № 449: <http://federalbook.ru/files/ТЕК/Soderzhanie/Tom%2014/VI/Postanovlenie.pdf>
5. **Распоряжение** Правительства России от 28.05.2013 № 861-р: http://energoeducation.ru/wpcontent/uploads/2015/11/LAW183743_0_20151002_142857_54085.pdf
6. **Ковалев К.Л.** Отечественные разработки электромеханических преобразователей и накопителей энергии на основе ВТСП. Сверхпроводники в электроэнергетике, 2016, т. 13, вып. 1: http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulleitein/bulleitein_v13_n1_2016.pdf
7. **Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Колчанова И.П.** Анализ состояния зарубежных и отечественных разработок по созданию сверхпроводниковых электрических машин. — Электричество, 2013, № 1, с. 2—13.
8. **Существующие** в мире проекты ВТСП электродвигателей и генераторов. Сверхпроводники в электроэнергетике, 2008, т. 5, вып. 3: http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulleitein/bulleitein_v5_n3_2008.pdf
9. **Bekker J.** Efficient Modelling of a Wind Turbine System for Parameter Estimation Applications: http://www.crses.sun.ac.za/files/research/completed-research/wind/jc_bekker.pdf
10. **Kovalev K., Kovalev L., Poltavets V., Samsonovich S., Pyasov R.** Synchronous Generator with HTS-2G field coils for Windmills with output power 1 MW. 11th European Conf. on Applied Superconductivity (EUCAS2013) IOP Publishing Journal of Physics: Conf. Series 507 (2014) 032023 doi:10.1088/1742-6596/507/3/032023. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/507/3/032023/pdf>
11. **Герашенко А.Н., Постников В.А., Самсонович С.Л.** Пневматические, гидравлические и электрические приводы летательных аппаратов на основе волновых исполнительных механизмов: Учебник. — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010, 548 с.
12. **Кацман М.М.** Расчет и конструирование электрических машин: Учеб. пос. для техникумов. — М.: Энергоатомиздат. 1984, 360 с.
13. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины: Учебник для вузов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 532 с.
14. **Козуб С.С.** Производство ВТСП реистрековых обмоток электрических машин. Сверхпроводники в электроэнергетике, 2016, т. 13, вып. 1: http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulleitein/bulleitein_v13_n1_2016.pdf
15. **Костюк В.В., Каторгин Б.И., Фирсов В.П., Ковалев К.Л., Равикович Ю.А., Тимушев С.Ф.** Кривообеспечение ВТСП электрогенераторов и электродвигателей. Инновационные технологии в энергетике. Кн. 3. Прикладная высокотемпературная сверхпроводимость. — М.: Наука, 2016, с. 77—114.

[03.07.2017]

А в т о р ы: Ковалев Константин Львович окончил в 1993 г. Московский инженерно-физический институт. В 2005 г. защитил докторскую диссертацию по сверхпроводниковым электрическим машинам. Заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института (МАИ).

Полтавец Владимир Николаевич окончил в 1966 г. Московский авиационный институт. В 1979 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Электрические машины». Ведущий научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Колчанова Ирина Петровна окончила в 1983 г. Московский авиационный институт. Старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Ильясов Роман Ильдусович окончил в 2003 г. Московский авиационный институт. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Магнитный подвес на основе объёмных высокотемпературных сверхпроводников для высокоскоростного наземного транспорта». Доцент кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Фирсов Валерий Петрович окончил в 1971 г. Московский авиационный институт. Руководитель отдела криогенных систем МАИ.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 10, pp 4—15

DOI:10.24160/0013-5380-2017-10-4-15

A 1 MV·A High-Temperature Superconducting Generator for Windmills

KOVALEV Konstantin L. (Moscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russia) — Head of the Department, Dr. Sci (Eng.)

POLTAVETS Vladimir N. (MAI, Moscow, Russia) — Leading Scientific Researcher, Cand. Sci. (Eng.)

KOLCHANOVA Irina P. (MAI, Moscow, Russia) — Senior Scientist

IL'YASOV Roman I. (MAI, Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

FIRSOV Valerii P. (MAI, Moscow, Russia) — Head of the Department

Work is underway at the leading foreign and Russian scientific centers on developing windmills employing the superconductivity effect. Generators constructed on the basis of high-temperature superconducting (HTSC) materials feature high specific power capacity and efficiency; they are more compact and have an increased service life. In addition, the use of a wind generator equipped with a wave multiplier makes it possible to obtain a higher generator rotation frequency and achieve a lighter weight of the windmill rotary part. The article presents the results from theoretical calculation and numerical simulation together with description of the design and results from testing Russia's first 1 MVA superconducting synchronous generator with the field winding made using a second-generation HTSC tape for windmills.

Key words: *superconducting generator, windmill, superconducting field windings, YBCO, cryostat, experimental model*

REFERENCES

1. **Itogi razvitiya mirovoi vetryenergetiki v 2016 g. Al'ternativnaya energiya** (Results of the development of the world wind power in 2016. Alternative energy): <http://altenergiya.ru/novosti/itogi-razvitiya-mirovoj-vetroenergetiki-v-2016.html>
2. **Spisok vetryanykh elektrostantsii Rossii** (List of wind power plants in Russia): <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
3. **Skorosti vetra v Rossii i stroitel'stvo vetryanykh elektrostantsii. Novaya Generatsiya** (Wind speeds in Russia and the construction of wind farms. New Generation): <http://www.manbw.ru/analitics/windrus.html>
4. **Postanovleniye Pravitel'stva Rossii ot 28.05.2013 No. 449** (Decree of the Government of the Russian Federation No. 449 of May 28, 2013): <http://federalbook.ru/files/TEK/Soderzhanie/Tom%2014/VI/Postanovlenie.pdf>
5. **Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossii ot 28.05. 2013 No. 861-p.** (Order of the Government of Russia of May 28, 2013, No. 861-p): http://energoeducation.ru/wpcontent/uploads/2015/11/LAW183743_0_20151002_142857_54085.pdf
6. **Kovalev K.L. Otechestvennye razrabotki elektromekhanicheskikh preobrazovatelei i nakopitelei energii na osnove VTSP. Sverkhprovodniki v elektroyenergetike** (Domestic developments of electromechanical converters and energy storage devices based on VTSP. Superconductors in electric power industry), 2016, vol. 13, iss. 1: http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bullein/bullein_v13_n1_2016.pdf
7. **Kovalev L.K., Kovalev K.L., Kolchanova I.P. Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)**, 2013, No. 1, pp. 2–13.
8. **Sushchestvuyushchiye v mire proyekty VTSP elektrodvidatelei i generatorov. Sverkhprovodniki v elektroyenergetike** (The existing projects in the world of VTSP electric motors and generators. Superconductors in electric power industry), 2008, vol. 5, iss. 3: http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bullein/bullein_v5_n3_2008.pdf
9. **Bekker J.** Efficient Modelling of a Wind Turbine System for Parameter Estimation Applications: http://www.crses.sun.ac.za/files/research/completed-research/wind/jc_bekker.pdf
10. **Kovalev K., Kovalev L., Poltavets V., Samsonovich S., Ilyasov R.** Synchronous Generator with HTS-2G field coils for Windmills with output power 1 MW. 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013) IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 507 (2014) 032023 doi:10.1088/1742-6596/507/3/032023: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/507/3/032023/pdf>
11. **Gerashchenko A.N., Postnikov V.A., Samsonovich S.L.** Pnevmaticheskiye, gidravlicheskiye i elektricheskiye privody letatel'nykh apparatov na osnove volnovykh ispolnitel'nykh mekhanizmov (Pneumatic, hydraulic and electric drives of aircraft based on wave actuators). Moscow, Publ. «MAI-PRINT», 2010, 548 p.
12. **Katsman M.M. Raschet i konstruirovaniye elektricheskikh mashin** (Calculation and design of electrical machines). Moscow, Energoatomizdat, 1984, 360 p.
13. **Ivanov-Smolenskii A.V. Elektricheskiye mashiny** (Electrical machines). Moscow, Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2006, 532 p.
14. **Kozub S.S. Proizvodstvo VTSP reistrekovykh obmotok elektricheskikh mashin. Sverkhprovodniki v elektroyenergetike** (Production of VTSP rake windings of electrical machines. Superconductors in electric power industry), 2016, vol.13, iss.1: http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bullein/bullein_v13_n1_2016.pdf
15. **Kostyuk V.V., Katargin B.I., Firsov V.P., Kovalev K.L., Ravikovich Yu. A., Timushev S.F. Kriobespecheniye VNSP elektrogeneratorov i elektrodvigatelei. Innovatsionnye tekhnologii v energetike. Kn. 3. Prikladnaya vysokotemperaturnaya sverkhprovodimost'** (Cryosupply of VTSP electric generators and electric motors. Innovative technologies in power engineering. Book. 3. Applied high-temperature superconductivity). Moscow, Publ. «Nauka», 2016, pp. 77–114.

[03.07.2017]